



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL
INFRAESTRUTURA E GERÊNCIA VIÁRIA**

GISELE MARILHA PEREIRA REGINATTO

**CARACTERIZAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUNHA, RIO DOS
CEDROS – SC, COM ÊNFASE EM ESCORREGAMENTOS
TRANSLACIONAIS**

**Florianópolis
2013**

GISELE MARILHA PEREIRA REGINATTO

**CARACTERIZAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUNHA, RIO DOS
CEDROS – SC, COM ÊNFASE EM ESCORREGAMENTOS
TRANSLACIONAIS**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil

Orientador:

Prof. Marciano Maccarini, PhD.

Coorientador:

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi,
Dr.

Florianópolis
2013

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

Reginatto, Gisele Marilha Pereira

Caracterização de movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC, com ênfase em escorregamentos translacionais / Gisele Marilha Pereira Reginatto ; orientador, Marciano MacCarini ; coorientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi. - Florianópolis, SC, 2013.

230 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Movimentos de massa. 3. Mapeamento geotécnico. 4. Modelagem. 5. Shalstab. I. MacCarini, Marciano. II. Higashi, Rafael Augusto dos Reis . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

**CARACTERIZAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUNHA, RIO DOS
CEDROS – SC, COM ÊNFASE EM ESCORREGAMENTOS
TRANSLACIONAIS**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil-PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Florianópolis, 15 de março de 2013.

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD.
Coordenador do PPGEC-UFSC

Prof. Marciano Maccarini, PhD.
ECV-UFSC (Orientador)

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
ECV-UFSC (Coorientador)

Comissão Examinadora:

Prof. Renato Fontes Guimarães, PhD. -UNB

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr. – ECV-UFSC

Prof. Masato Kobiyama, Dr. – ENS-UFSC

Dedico aos meus pais,
Flávio e Maria de Lourdes,
aos meus irmãos Flávia,
Vinícius e Amanda e ao
meu filho Arthur.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido força, sabedoria e perseverância.

Aos meus pais, Flávio e Maria de Lourdes, que, apesar da distância, estiveram sempre presente. Obrigada pelo amor incondicional, exemplo, constante apoio e por nunca me deixarem desistir.

Aos meus irmãos, Flávia, Vinícius e Amanda, pelo amor, companheirismo, paciência, incentivo e pelas longas conversas sobre crases e vírgulas.

À minha madrinha Dione e à minha tia Sirlei, pelo carinho, alegria contagiante e auxílio na correção desta pesquisa.

A todos os meus familiares pela torcida e orações.

Ao meu professor e orientador Marciano Maccarini, o grande responsável por despertar em mim o fascínio pela mecânica dos solos, desde os tempos da minha graduação. Obrigada pelo exemplo de integridade e dedicação. Pelos ensinamentos, apoio, paciência e muitas vezes pelo ombro amigo. O Senhor é um exemplo de que o trabalho torna-se prazeroso quando se tem amor pelo que se faz.

Ao professor Rafael Augusto dos Reis Higashi, meu coorientador, pelos conhecimentos transmitidos, auxílio na realização dos ensaios de laboratório e de campo e pela amizade. Obrigada por ter contribuído de forma especial para a aplicação nesta pesquisa de uma importante metodologia de gestão ambiental, o mapeamento geotécnico.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de realização do mestrado. Também aos Professores deste Programa, pelos ensinamentos.

Ao Professor Masato Kobiyama por ter confiado a realização de parte de um grande projeto de prevenção de desastres a esta pesquisa. Obrigada pelo apoio financeiro, científico, pela disponibilização de material e auxílio em campo.

À Professora Cláudia Weber Corseuil, pelo carinho, disponibilidade e auxílio na área de geoprocessamento. Foi nas suas aulas que tive o primeiro contato com o ArcGis.

Obrigada também pela ajuda imprescindível na elaboração de artigos e correção desta pesquisa.

Ao Professor Edison Ramos Tomazzoli, pela ajuda com a interpretação de lâminas petrográficas e pelas explicações sobre o “gnaisse granulítico”.

Meu reconhecido agradecimento ao Professor Renato Guimarães, pelas constantes conversas via email sobre o SHALSTAB, através das quais pude sanar inúmeras dúvidas. Obrigada pela disponibilidade, humildade e simpatia. Foi um imenso prazer conhecê-lo pessoalmente na banca.

Um obrigada especial aos demais membros da comissão examinadora, por se disporem a participar e a contribuir de forma valiosa com essa pesquisa.

Aos amigos que pude conhecer no Laboratório de Mecânica dos Solos da Engenharia Civil, César Godoi, Carolina, Caroline, Murilo, Rodrigo, Fábio, Douglas e Regiane. Àqueles do Laboratório de Pavimentação da Engenharia Civil, Greice e Yader. Igualmente, aos amigos do Laboratório de Hidrologia da Engenharia Sanitária e Ambiental, especialmente a Laís (*in memoriam*), Nadine, Chêlsia, Patrícia e Ermínio. Também da Engenharia Sanitária e Ambiental, Daniele (Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos - Labeflu) e Naiara (Laboratório de Resíduos Sólidos - Lareso). Jamais esquecerei o suporte técnico, carinho, companheirismo e a amizade de todos.

Ao funcionário do Laboratório de Mecânica dos Solos da Engenharia Civil, o amigo Edi.

À família Corrente, do município de Rio dos Cedros, pela acolhida e auxílio em campo.

Minha eterna gratidão à amiga Ângela e ao amigo Estefânio, pela amizade, comprometimento e aporte em quaisquer circunstâncias. Vocês foram essenciais na conclusão desta pesquisa.

À Prosul nas pessoas dos Engenheiros Clarissa e Rafael. Igualmente aos meus companheiros e amigos de trabalho, Professora Glaci, Professor Victor Hugo, Lilian, Mirna e Fernanda.

Agradeço de coração a compreensão das pessoas que abdiquei atenção no período de composição desta

dissertação. Meus pedidos de desculpa pela minha ausência.

A todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para o desenvolvimento deste mestrado, embora não tenham sido citados.

“Tão pesado é o céu
que toda embarcação
rasga o mar
e deixa a trilha de
coveção que traz do
fundo a esperança de que
volte são e salvo
e cheio de peixe.
Pra dar pra rezadeira que
passou a noite inteira
vendo a vela desmanchar
na mesa porque amanhã
tem Festa do Divino
e seu filho não pode
demorar.
Porque esse vento sul
que sai por trás das
dunas faz: uuu, uuu...
Sabe que aqui se paga
o que aqui se faz
e de dentro da nave
a chuva parece uma
nuvem de fumaça tóxica.
Acende uma vela pra
cada santo da procissão
pra que quando te atirar
contra a arrebentação
sobrevier.
A força que faz as ondas
e a ressaca do mar no
“inside smoky prédios
breakdown”.
No meio entre o asfalto
as casas e os shopping
centeres.
Entrando pelos esgotos,
nos arranha-céus, salve o
caranguejo antes que a
onda *varre* o mangue.”

Música: Vento Sul
Composição: Vinícius Pereira Reginatto

RESUMO

Os movimentos de massa no Brasil geram inúmeros problemas sociais e econômicos. Logo, é imprescindível compreender os mecanismos desses fenômenos e a influência de fatores externos na sua deflagração, contribuindo, dessa forma, com subsídios de prevenção eficazes. Neste contexto, o uso de modelos matemáticos, baseados em conceitos hidrológicos e de estabilidade de encosta, aliado ao mapeamento geotécnico e a técnicas de sensoriamento remoto, compõe uma metodologia pertinente. A presente pesquisa objetiva identificar áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais, utilizando o modelo computacional SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) e caracterizá-las quanto a parâmetros geotécnicos, topográficos (altitude e declividade) e de uso e ocupação do solo. A área de estudos é a bacia hidrográfica do Rio Cunha, situada no município de Rio dos Cedros/SC e pertencente à região do médio vale do Itajaí, uma das regiões mais atingida pelos desastres hidrológicos de novembro de 2008. A metodologia consistiu no mapeamento das cicatrizes resultantes dos movimentos ocorridos na área de estudos, na determinação em campo e em laboratório de parâmetros do solo (físicos, de resistência e espessura) e na elaboração de mapas temáticos: modelo digital de elevação e seus derivados (declividade e área de contribuição), mapa de uso e ocupação do solo e mapa geotécnico preliminar. Na modelagem de áreas instáveis foram realizadas 48 simulações com diferentes combinações dos parâmetros do solo (densidade, coesão efetiva, ângulo de atrito efetivo e espessura), dentre as quais definiu-se aquela que melhor representa o fenômeno na área em estudo com base nas cicatrizes dos movimentos de 2008. As áreas de instabilidade definidas pelo modelo, bem como as cicatrizes dos movimentos foram confrontadas com os mapas temáticos para a sua caracterização, contribuindo para a elaboração de um banco de dados. Como resultado final tem-se um mapa de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais para a bacia em estudo, que, aliado ao

banco de dados das áreas de instabilidade geram subsídios para atuar na identificação de áreas sujeitas a movimentos de massa, auxiliando no planejamento preliminar de uso e ocupação do solo da área. A metodologia empregada neste estudo pode ser aplicada por órgãos públicos para a redução de desastres relacionados a movimentos de massa, atuando no planejamento de ações preventivas.

Palavras-chave: escorregamentos translacionais, mapeamento geotécnico, SHALSTAB

ABSTRACT

Mass movements in Brazil generate numerous social and economic problems. Therefore, it is essential to understand the mechanism of these phenomena and the influence of external factors in their generation, contributing thus to effective prevention grants. In this context, the use of mathematical models, based on concepts hydrological and slope stability, combined with geotechnical mapping and remote sensing techniques, composing a relevant methodology. This research aims to identify areas susceptible to landslide using the computational model SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability Model) and define them as geotechnical, topographic parameters (altitude and slope) and the use and occupation of land. The study is the watershed of the Rio Cunha, in the municipality of Rio dos Cedros/SC and it belongs to the middle valley of Itajaí, one of the regions most devastated by hydrological disasters of November 2008. The methodology consisted in mapping the consequences resulting from movements in the study area, both in the field and in laboratory parameters (physical, strength and thickness) soil and preparation of thematic maps: digital elevation model and derivatives (slope and contributing area), map of use, land use map and geotechnical preliminary map. on modeling of unstable areas, 48 simulations were done with different combinations of soil parameters (density, effective cohesion, effective angle of friction and thickness) in which, the best one that better represents this phenomenon is defined based on movements of 2008. Areas of instability defined by the model, as well as the scars of the movements were confronted with thematic maps for its characterization, contributing to the development of a database. As a result, there is a map of susceptible areas to landslides for watershed study. Also, there is a database of areas of instability that generate subsidie in order to identify susceptible areas to mass movements, helping in a preliminary planning of use and occupation of the area. The methodology used in this study can be applied by

public agencies for disaster reduction related to mass movements, performing preventive action plannings.

Keywords: translational landsliding, geotechnical mapping, SHALSTAB

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos que constituem uma corrida de lama	49
Figura 2 – Chuva anual em Rio dos Cedros de 1942 a 2008.....	59
Figura 3 – Hietograma do mês de novembro de 2008	60
Figura 4 – Fluxo de detritos – A.....	61
Figura 5 – Ilustração do ano de 2010 do fluxo de detritos – B	61
Figura 6 – Foto aérea dos fluxos de detritos A e B	62
Figura 7 – Localização da região do Atlântico Sul e da bacia do Itajaí.....	63
Figura 8 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Cunha	64
Figura 9 – Mapa de vegetação da bacia do Rio Cunha	65
Figura 10 – Mapa de cobertura e uso da bacia do Rio Cunha.....	66
Figura 11 – Mapa pedológico da bacia do Rio Cunha	68
Figura 12 – Mapa geológico da bacia do Rio Cunha.....	71
Figura 13 – Fotomicrografia de aspectos mineralógicos da rocha	73
Figura 14 – Unidades geomorfológicas da bacia do Rio Cunha	74
Figura 15 – Tipos de Modelados da bacia do Rio Cunha.....	75
Figura 16 – MDE da bacia do Rio Cunha.....	76
Figura 17 – Classes de relevo segundo EMBRAPA (1999)	76
Figura 18 – Paisagem da bacia suscetível a movimentos de massa.....	77
Figura 19 – Mapa de zoneamento segundo o Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável de Rio dos Cedros de 2006.....	78
Figura 20 – Estruturação da pesquisa.....	81
Figura 21 – Retificação da drenagem para jusante (direção representada pelo retângulo vermelho).....	83
Figura 22 – Fluxograma de atividades do mapeamento geotécnico	87
Figura 23 – Sobreposição dos mapas pela Metodologia Davison Dias (1995).....	88
Figura 24 – Classificação dos polígonos (metodologia de Davison Dias).....	89
Figura 25 – Exemplo de ajuste da unidade com a curva de nível na área em estudo	92
Figura 26 – Áreas de interesse (delimitadas por retângulos)	93
Figura 27 – Coleta de amostras de solo com o trado.....	94
Figura 28 – Unidades de solos sedimentares e residuais	95
Figura 29 – Horizonte C de um solo de origem residual.....	97
Figura 30 – Vegetação muitas vezes evidenciada em depósitos de encosta (samambaia de campo).....	98
Figura 31 – Estrutura caótica do perfil de solo	98
Figura 32 – Pontos de coleta das amostras.....	100
Figura 33 – Armazenamento das amostras de solo.....	100
Figura 34 – Aplicação do modelo SHALSTAB.....	104
Figura 35 – Classes de altimetria de 50 em 50m	113
Figura 36 – Intervalos de declividade de 5 em 5°	114
Figura 37 – Mapa de uso e ocupação do solo do ano de 2006.....	116
Figura 38 – Vegetação nativa, pastagem e plantação de eucalipto e pinus na bacia do Rio Cunha	117
Figura 39 – Área de rizicultura circundada por pastagem e mata nativa na bacia do Rio Cunha	117
Figura 40 – Área de pastagem em processo de instabilização	118
Figura 41 – Mapa Litológico da bacia	119
Figura 42 – Mapa geotécnico preliminar	120
Figura 43 – Mapa geotécnico preliminar simplificado	122
Figura 44 – Mapa geotécnico preliminar modificado	123

Figura 45 – Mapa de inventário dos movimentos de massa	125
Figura 46 – Fluxo de detritos de origem natural (cicatriz 1)	126
Figura 47 – Escorregamento translacional ao longo da estrada	127
Figura 48 – Ocorrência de escorregamento translacional e ausência de sistema de drenagem na estrada	127
Figura 49 – Escorregamento rotacional	128
Figura 50 – Escorregamento rotacional em cultura de banana (área de rejeito)	128
Figura 51 – Rompimento de talude de corte.....	129
Figura 52 – Sobreposição do mapa de inventário de movimentos de massa ao mapa geotécnico preliminar modificado	130
Figura 53 – Características do fluxo de detritos da Cicatriz 4	133
Figura 54 – Escorregamentos translacionais seguidos de fluxo de detritos de talude de corte na cicatriz 1	134
Figura 55 – Escorregamento rotacional seguidos de fluxo de detritos na cicatriz 2	134
Figura 56 – Escorregamento rotacional e translacional seguido de fluxo de detritos na cicatriz 3	135
Figura 57 – Escorregamento rotacional e translacional seguido de fluxo de detritos na cicatriz 4	135
Figura 58 – Fluxo de detritos na cicatriz 5.....	135
Figura 59 – Perfil topográfico da encosta.....	137
Figura 60 – Granulometria dos materiais do grupo 1	139
Figura 61 – Granulometria dos materiais do grupo 2	139
Figura 62 – Depósito coluvionar em processo de intemperização (fotografia na zona de ruptura R2 da cicatriz 4).....	143
Figura 63 – Mapa de área de contribuição empregado na modelagem com SHALSTAB.....	154
Figura 64 – Comparação entre os escorregamentos mapeados e os escorregamentos aleatórios na simulação 19	159
Figura 65 – Comparação entre os escorregamentos mapeados e os escorregamentos aleatórios na simulação 21	159
Figura 66 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais da simulação 19	161
Figura 67 – Distribuição das classes de estabilidade na área	161
Figura 68 – Distribuição dos escorregamentos nas classes de estabilidade.....	162
Figura 69 – Distribuição dos escorregamentos na declividade <i>versus</i> área de contribuição	163
Figura 70 – Localização dos movimentos de massa no mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais.....	165
Figura 71 – Distribuição da altitude nas classes instáveis e estáveis.....	166
Figura 72 – Distribuição da declividade nas classes instáveis e estáveis.....	167
Figura 73 – Distribuição do uso e ocupação do solo nas classes instáveis e estáveis.....	168
Figura 74 – Distribuição do uso do solo nas áreas instáveis.....	169
Figura 75 – Distribuição das unidades geotécnicas preliminares nas classes instáveis e estáveis	170
Figura 76 – Distribuição das unidades geotécnicas preliminares nas áreas instáveis	171
Figura 77 – Variação da estabilidade na profundidade de 5 m.....	172
Figura 78 – Variação da estabilidade na profundidade de 10 m.....	172
Figura 79 – Variação da estabilidade na profundidade de 11 m.....	173

Figura 80 – Variação da estabilidade na profundidade de 12 m	173
Figura 81 – Variação da estabilidade na profundidade de 13 m	174
Figura 82 – Variação da estabilidade na profundidade de 14 m	174
Figura 83 – Variação da estabilidade na profundidade de 15 m	175
Figura 84 – Variação da estabilidade na profundidade de 20 m	175
Figura 85 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 1	177
Figura 86 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 2	177
Figura 87 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 3	178
Figura 88 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 4	178
Figura 89 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 5	179
Figura 90 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 6	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos desastres naturais	33
Tabela 2 – Descrição das unidades pedológicas presentes na bacia.....	68
Tabela 3 – Descrição pedológica voltada ao mapeamento geotécnico	70
Tabela 4 – Descrição das Zonas da bacia do Rio Cunha	79
Tabela 5 – Índices urbanísticos	80
Tabela 6 – Pontos de controle em cada classe de uso e ocupação do solo da bacia do Rio Cunha	86
Tabela 7 – Simbologia simplificada das classes pedológicas	90
Tabela 8 – Geologia e Litologia simplificada	90
Tabela 9 – Representação dos depósitos de encosta no mapa.....	98
Tabela 10 – Dados de entrada do modelo SHALSTAB	103
Tabela 11 – Classes de estabilidade geradas pelo SHALSTAB.....	109
Tabela 12 – Intervalos de altitude e respectivas áreas	115
Tabela 13 – Intervalos de declividade e respectivas áreas	115
Tabela 14 – Litologia relacionada à geologia	118
Tabela 15 – Simplificação das unidades geotécnicas preliminares.....	121
Tabela 16 – Abrangência dos solos residuais e sedimentares na bacia	124
Tabela 17 – Dimensões dos fluxos de detritos	129
Tabela 18 – Banco de dados dos fluxos de detritos.....	132
Tabela 19 – Resumo dos ensaios de caracterização física do solo	138
Tabela 20 – Classificação das amostras de solo (MCT, SUCS e AASHTO) ..	138
Tabela 21 – Parâmetros obtidos no ensaio de cisalhamento direto	141
Tabela 22 – Ocorrência das unidades geotécnicas preliminares em diferentes declividades.....	144
Tabela 23 – Ocorrência dos grupos de solo em diferentes declividades	144
Tabela 24 – Classes de relevo na unidade Cgn	149
Tabela 25 – Movimentos de massa na unidade Cgn.....	150
Tabela 26 – Características geotécnicas do Cambissolo de gnaiss granulítico da área de estudo (horizonte C)	151
Tabela 27 – Características do horizonte A e B do solo de alteração de um gnaiss granulítico	152
Tabela 28 – Características geotécnicas de solos de colúvio na unidade Cgn	153
Tabela 29 – Parâmetros do solo residual de gnaiss granulítico empregados na modelagem com o SHASTAB.....	155
Tabela 30 – Descrição das simulações.....	156
Tabela 31 – Distribuição da área da bacia do Rio Cunha nas classes de estabilidade do SHALSTAB.....	158
Tabela 32 – Distribuição da área da bacia do Rio Cunha nas classes de estabilidade do SHALSTAB.....	158

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas

A.F.	Areia fina
A.G.	Areia grossa
A.M.	Areia média
A	Aluviais
A-4/A-5	Solos argilosos
A7-5/A7-6	Solos siltosos
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ADS	Airborne Digital Sensor
ag	Argilito
Ala	Complexo Luís Alves
AML	ArcInfo Macro Language
a	Arenito
an	Andesito
ANA	Agência Nacional das Águas
Anf	Anfíbio
Ap+Lt	Pastagem, agricultura, fruticultura, pecuária reflorestamento e vegetação secundária
AQ	Areia Quartzosa
ar	Ardósia
Asq	Solos aluviais substrato sedimentos quaternários
ASTER	Advanced Spacebourne Thermal Emission and Reflection Radiometer
Atf	Modelado de Acumulação Terraço Aluvial
b	Basalto
B	Brunizém
BD	Banco de dados
br	Brecha
Bi	Horizonte B do perfil de solo incipiente
Bt	Horizonte B do perfil de solo textural
Bta	Biotita
BV	Brunizém Vértico
c	Conglomerado
C	Cambissolo
ca	Calcáreo
Ca	Cambissolo de arenito
Ca38	Cambissolo Álico
Ca39	Cambissolo Álico
Ca96	Cambissolo Álico
CB	Cambissolo Bruno
CD	Cisalhamento Direto
Cd2	Cambissolo Distrófico e Álico
Cd5	Cambissolo Distrófico e Eutrófico

Cd9 Cambissolo Distrófico e Eutrófico
 CEPED Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres
 Cfb Clima temperado úmido com verão temperado
 Cgn Cambissolo substrato gnaiss
 CIRAM Centro de Informações de Recursos Ambientais e de
 Hidrometeorologia de Santa Catarina
 cm1 Complexo metamórfico (1)
 CNRH Conselho Nacional de Recursos Hídricos
 CPm Formação Mafra
 cr Carvão
 CRED Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
 d Diorito
 D Modelado de Dissecção
 da Dacito
 DE Depósito de Encosta
 Dm Modelado de Dissecção Montanhas
 DmGfb Floresta Ombrófila Densa, montana, sedimento gonduânico,
 formação florestal baixa
 DmMfb Floresta Ombrófila Densa, montana, rocha metamórfica,
 formação florestal baixa
 Do Modelado de Dissecção Morraria
 DsAfa Floresta Ombrófila Densa, sub-montana, sedimento
 gonduânico, formação florestal alta
 DsMfa Floresta Ombrófila Densa, sub-montana, rocha metamórfica,
 formação florestal alta
 E Patamares e Platôs do Alto Rio Itajaí
 EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
 EM-DAT Emergency Disaster Data Base
 ENVI Environment for Visualizing Images
 EPAGRI Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural
 de Santa Catarina
 ESRI Environmental Systems Research Institute
 EUA *United States American*
 f Folhelho
 Feld Feldspato
 g Granito
 gd Granitóide
 GH Glei
 gl Granulito
 gn Gnaiss
 Gp Grande porte
 GPS Global Positioning System
 HO Solo Orgânico
 IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
 IP Índice de plasticidade
 IPT Instituto de Pesquisa Tecnológica

LA	Latossolo Amarelo
LABHIDRO	Laboratório de Hidrologia da UFSC
LB	Latossolo Bruno
LBC	Latossolo Bruno Câmbico
LBR	Latossolo Bruno Câmbico
LE	Latossolo Vermelho-Escuro
LG'	Argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LR	Latossolo Roxo
LV	Latossolo Vermelho-Amarelo
M	Serras Cristalinas Litorâneas
ma	Mármore
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MDE	Modelo Digital de Elevação
MH	Siltes de alta plasticidade
ML	Siltes de baixa plasticidade
Mp	Médio porte
MZ1	Macrozona de Interesse Ambiental e Turístico
MZ2	Macrozona denominada Ocupação Rarefeita
NG'	Argilas siltosas e argilas arenosas não-lateríticas
NA	areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não-lateríticos
NA'	areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas
NS'	siltes cauliniticos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos
NS'	Siltes arenosos e siltes argilosos não-lateríticos
ONU	Organização das Nações Unidas
Op	Minerais opacos
p	Pelito
P	Podzóis Indiscriminados
PB	Podzólico Bruno-Acidentado
PE	Podzólico Vermelho-Escuro
PL	Planossolo
PLP	Planossolo Plíntico
PLV	Planossolo Vértico
Pp	Pequeno porte
PT	Plintossolo
PV	Podzólico Vermelho-Amarelo
PVL	Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico
PVL _a 4	Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico Álico
PVL _a 5	Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico Álico
PVLgn	Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico substrato gnaiss
q	Quartzito
QHa	Sedimentos Aluvionares
Qz	Quartzo

R	Litólico
r	Riolito
R1	Zona de ruptura
R 2	Zona de ruptura
R+Vs	Reflorestamento e vegetação secundária
RGB	Red, Green, Blue
Rp	Reflorestamento
s	Siltito
SAD69	South American Datum
SC	Santa Catarina
SHALSTAB	Shallow Landsliding Stability Model
si	Sienito
SI	Índice de Estabilidade
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SM	areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas
SINMAP	Stability Index Mapping
sq	Sedimentos quaternários
st	Sedimentos terciários
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
Ta	Atividade de argila alta
Tb	Atividade de argila baixa
TB	Terra Bruna-Estruturada
TBR	Terra Bruna-Roxa
TBV	Terra Bruna Podzólica
TE	Talude Exposto
TIN	Irregular Triangulated Network
TR	Terra Roxa Estruturada
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USCS	Unified Soil Classification System
UTM	Universal Transversa de Mercator
V	Vertissolo
Vs+Ap+Lp	Pastagem, agricultura, fruticultura, pecuária e reflorestamento, vegetação secundária
Vs+R	Vegetação secundária e reflorestamento
x	Xisto
ZERMOS	Zones exposed to risks of soil movements
ZOC	Zona de Ocupação Controlada
ZOR	Zona de Ocupação Rarefeita
ZPP	Zona de Preservação Permanente

Alfabeto Latino

<i>a</i>	Área de contribuição[m ²]
<i>A</i>	Modelado de Acumulação [adimensional]
<i>b</i>	Comprimento de contorno [m]
<i>B</i>	Planícies Aluviais [adimensional]
<i>c'</i>	Coesão efetiva [kPa]

g	Aceleração gravitacional	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
h	Nível do lençol freático.....	$[\text{m}]$
Q	Intesidade da chuva	$[\text{mm}]$
T	Transmissidade do solo	$[\text{m}^2\cdot\text{dia}^{-1}]$
W	Índice de umidade	$[\text{adimensional}]$
W_{nat}	Umidade natural	$[\text{adimensional}]$
γ_{nat}	Peso específico natural	$[\text{kN}/\text{m}^3]$
z	Espessura do solo	$[\text{m}]$

Alfabeto Grego

ρ_s	Densidade do solo	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_w	Densidade da água.....	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
θ	Ângulo de declividade	$[\text{graus}]$
σ	Tensão normal	$[\text{kPa}]$
τ	Tensão cisalhante.....	$[\text{kPa}]$
φ'	Ângulo de atrito efetivo	$[\text{graus}]$
μ	Poropressão.....	$[\text{kPa}]$
δ	Massa específica.....	$[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	33
1.1	MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	37
1.2	OBJETIVOS.....	39
1.2.1	OBJETIVO GERAL	39
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	39
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	41
2.1	MECÂNICA DOS MOVIMENTOS DE MASSA.....	41
2.1.1	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	41
2.1.2	CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA	43
2.2	MAPEAMENTO DOS ESCORREGAMENTOS.....	50
2.2.1	MÉTODOS DE PREVISÃO DE ESCORREGAMENTOS	50
2.2.2	MODELOS DE PREVISÃO	53
2.3	MODELO SHALSTAB	55
2.4	ESTUDOS RELACIONADOS À BACIA DO RIO CUNHA	58
3	ÁREA DE ESTUDOS.....	63
3.1.1	LOCALIZAÇÃO	63
3.1.2	VEGETAÇÃO E USO DO SOLO	65
3.1.3	CLIMA.....	66
3.1.4	PEDOLOGIA	67
3.1.5	GEOLOGIA	71
3.1.6	GEOMORFOLOGIA E ZONEAMENTO	73
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	81
4.1	MATERIAIS	81
4.1.1	DADOS CARTOGRÁFICOS	81
4.1.2	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	82
4.2	MÉTODOS	82
4.2.1	MAPEAMENTO DE ASPECTOS TOPOGRÁFICOS	82
4.2.2	MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	84
4.2.3	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	86
4.2.3.1	MAPA GEOTÉCNICO PRELIMINAR	87
4.2.3.2	MAPA GEOTÉCNICO PRELIMINAR MODIFICADO	92
4.2.3.3	UNIDADE GEOTÉCNICA SUSCETÍVEL AOS MOVIMENTOS	95
4.2.3.4	ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS (BD)	99
4.2.4	MODELAGEM DOS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS	102
4.2.4.1	MODELO DE ESTABILIDADE DE ENCOSTA INFINITA	105
4.2.4.2	MODELO HIDROLÓGICO	106
4.2.4.3	MODELO DE ESTABILIDADE ACOPLADO AO HIDROLÓGICO	107
4.2.4.4	PARÂMETROS DO SOLO	110
4.2.4.5	VARIÁVEIS ESPACIAIS TOPOGRÁFICAS.....	110
4.2.5	ELABORAÇÃO DO MAPA DE SUSCETIBILIDADE	111
5	RESULTADOSE DISCUSSÕES.....	113
5.1	MAPAS TOPOGRÁFICOS.....	113
5.2	MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	116
5.3	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	118

5.3.1	MAPA GEOTÉCNICO PRELIMINAR	118
5.3.2	MAPA GEOTÉCNICO PRELIMINAR MODIFICADO	122
5.3.3	MAPA DE INVENTÁRIO DOS MOVIMENTOS DE MASSA	124
5.3.4	IDENTIFICAÇÃO DA UNIDADE GEOTÉCNICA SUSCETÍVEL AOS MOVIMENTOS	129
5.3.5	BANCO DE DADOS (BD) DOS FLUXOS DE DETRITOS	131
5.3.6	CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS PRELIMINARES	143
5.4	MODELAGEM DOS ESCORREGAMENTOS COM SHALSTAB.....	153
5.5	COMPARAÇÃO ENTRE OS MAPAS DE SUSCETIBILIDADE E OS MAPAS TEMÁTICOS.....	166
5.6	AValiação dos parâmetros do solo na instabilidade	171
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	181
6.1	CONCLUSÕES	181
6.2	RECOMENDAÇÕES	183
	REFERÊNCIAS	185
	ANEXOS	195

1 INTRODUÇÃO

Os fenômenos naturais, especialmente aqueles que se referem a movimentos de massa associados a condicionantes hidrológicos, ou seja, a dinâmica da água no solo e na rocha, comumente geram danos às sociedades. Quando tais fenômenos são responsáveis por perdas sociais ou econômicas podem ser denominados desastres naturais (KOBAYAMA; REGINATTO; MICHEL, 2010).

Segundo o *Emergency Disaster Data Base* (EM-DAT) do *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED), órgão responsável pelas análises de ocorrências dos desastres naturais no mundo, os movimentos de massa são divididos em secos e úmidos. O primeiro está associado apenas a eventos geofísicos, como por exemplo, os terremotos. O segundo está relacionado com os condicionantes hidrológicos e meteorológicos (SCHEUREN et al., 2008). A última classificação dos desastres naturais adotada pelo CRED pode ser observada na Tabela 1 (BELOW; WIRTZ; GUHA-SAPIR, 2009).

Tabela 1 – Classificação dos desastres naturais

Classificação	Principais tipos
Geofísico	Terremotos, vulcões, movimentos de massa secos
Meteorológico	Tempestade
Hidrológico	Inundações, movimentos de massa úmidos
Climatológico	Temperaturas extremas, secas, incêndios
Biológico	Epidemias, pragas e infestações de insetos

Fonte: Modificado de Below, Wirtz e Guha-Sapir (2009)

Os desastres podem ser minimizados, enquanto que as ocorrências naturais dos fenômenos por comporem processos naturais evolutivos, estarão sempre presentes no ambiente. Os processos evolutivos que ocorrem na paisagem são compostos por diferentes tipologias de movimentos de massa. Dentre estas, segundo dados fornecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), os escorregamentos encontram-se entre os fenômenos associados às ocorrências de desastres que mais causam

prejuízos de ordem econômica e em número de vítimas no mundo (GUIMARÃES et al., 2008).

Ressalta-se que os escorregamentos compõem processos naturais de movimentos de massa, importantes na evolução geomorfológica do relevo em regiões montanhosas e serranas, predominantemente em locais de clima úmido (TOMINAGA, 2009). Guimarães et al. (2008) citam que o Brasil apresenta condições geomorfológicas e climáticas propícias para a ocorrência desses fenômenos, os quais são mais observados no Sul, Sudeste e Nordeste, destacando-se no Sudeste a Serra do Mar. Neste contexto, a ocorrência dos escorregamentos nesse país tropical é evidenciada principalmente durante as estações chuvosas.

O aumento da intensidade e da frequência dos desastres pode ser ocasionado por ações antrópicas. Para o caso dos escorregamentos, a ocupação de encostas com declividade acentuada aumenta o número de pessoas em áreas de risco. Goerl et al. (2009), após estudos de casos, relacionaram a ocorrência de escorregamentos ao planejamento inadequado do uso e ocupação do solo, que pode ser evidenciado pela má execução de cortes nas encostas para a construção de casas, bem como pela presença de aterros com sistemas de drenagem indevidos. Cunha et al. (1991) citam a remoção da vegetação como outro fator de instabilização das encostas.

No estado de Santa Catarina, Kobiyama et al. (2009) chama a atenção para as ocorrências de escorregamentos que vêm superando cada vez mais as de inundações, tornando-se urgente o estudo desse fenômeno para compor medidas de prevenção. No ano de 2008 esse estado sofreu uma das maiores tragédias registradas até o momento, relacionadas a precipitações anômalas, as quais compõem os chamados desastres hidrológicos (inundações e escorregamentos). Segundo dados da Defesa Civil de Santa Catarina, nessa tragédia foram registrados 80.000 desabrigados, 135 vítimas fatais e prejuízos econômicos na ordem de milhões de reais. Em consequência disso, diversos municípios decretaram estado de calamidade pública, sendo os mais atingidos aqueles localizados no Vale do Itajaí (GOERL et al., 2009).

Contudo, Tominaga (2009) enfatiza que é possível minimizar os prejuízos econômicos e sociais gerados pelos escorregamentos, por meio de planejamento e gerenciamento adequado. Delgado (2006) cita em seu trabalho, que a ferramenta mais eficaz na redução de desastres é a sua prevenção. Kobiyama et al. (2006) e Tominaga (2009) mencionam respectivamente a importância do entendimento dos mecanismos dos fenômenos naturais e do estudo dos seus fatores condicionantes como subsídio para a prevenção dos mesmos. Levantamentos e análises de eventos que já aconteceram, somados ao constante monitoramento, também auxiliam no entendimento e na previsão de novas ocorrências (UN-ISDR, 2004).

Sabe-se que a determinação dos locais com potencialidade de ocorrência de escorregamentos não é uma tarefa simples, tendo em conta a diversidade e quantidade de fatores naturais e antrópicos envolvidos na sua deflagração. Diversas metodologias vêm sendo desenvolvidas para atuar de forma eficaz na predição desses fenômenos, sendo que algumas vêm sendo também elaboradas para quantificar o risco associado ao evento (FERNANDES et al., 2001).

Dentre as metodologias de previsão evidencia-se a importância e a eficiência da modelagem matemática, associada a um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Pesquisas investigativas de escorregamentos empregando modelos matemáticos integrados a um SIG, em bacias hidrográficas com usos múltiplos, podem ser encontradas, por exemplo, em trabalhos realizados por Dietrich e Montgomery (1998), Guimarães et al. (2003), Meisina e Scarabelli (2007) e Zaidan e Fernandes (2009).

Observa-se ainda, que o mapeamento geotécnico também compõe uma metodologia pertinente na previsão dos escorregamentos, atuando principalmente na caracterização destes fenômenos e dos locais atingidos pelos mesmos. De acordo com Diniz (1998) o mapeamento geotécnico é uma ferramenta útil ao planejamento do solo e resulta na elaboração de um mapa ou carta geotécnica,

podendo ser classificados em carta de suscetibilidade de risco e de aptidão de uso. Diversas metodologias foram desenvolvidas em diferentes países para realizar esse tipo de mapeamento, dentre as quais Higashi (2006) menciona a International Association Engineering Geology (IAEG), Zones exposed to risks of soil movements (ZERMOS) e nacionalmente a metodologia do Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), Zuquette (1987) e de Davison Dias (1995).

Em relação à modelagem matemática, dentre os diferentes modelos que compõem as metodologias de previsão, destaca-se o modelo SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*), o qual integra um modelo de estabilidade de encostas a um modelo hidrológico. Esta associação resulta na identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais, as quais correspondem aos locais onde ocorre a desagregação do material, ou seja, onde ocorre a ruptura.

O modelo SHALSTAB vem sendo utilizado em diferentes locais de ocorrência de escorregamentos, como por exemplo: em bacias hidrográficas localizadas no Maciço da Tijuca-RJ, por pesquisadores como Guimarães (2000), Fernandes et al. (2001) e Gomes (2006); em Minas Gerais por Ramos et al. (2002) e, em Santa Catarina por Higashi e Michel (2010). Esse modelo é de simples aplicação e considera em suas análises parâmetros climáticos e topográficos, bem como propriedades físicas e de resistência do solo. Permite gerar cenários de suscetibilidade em função de diversos eventos pluviométricos e diferentes parâmetros de resistência dos solos.

Assim, em ambiente SIG, o SHALSTAB integrado ao mapeamento geotécnico compõe uma ferramenta importante na prevenção de desastres relacionados a escorregamentos, gerando subsídios para a compreensão dos mecanismos e dos fatores condicionantes desse fenômeno. Essa ferramenta pode auxiliar ainda no planejamento do uso e ocupação do solo, contribuindo para a mitigação dos possíveis danos e prejuízos que os desastres podem causar à sociedade.

1.1 Motivação da pesquisa

A presente pesquisa é composta pelo mapeamento geotécnico e análise de suscetibilidade a escorregamentos em uma bacia hidrográfica no município de Rio dos Cedros-SC, utilizando o modelo SHALSTAB associado a levantamentos de campo e ensaios de laboratório. Ela faz parte do projeto “Prevenção e Mitigação de Desastres Hidrológicos na Bacia do Rio dos Cedros – SC”, que foi elaborado pelo Laboratório de Hidrologia (Labhidro) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e vem sendo desenvolvido em parceria com o Laboratório de Mecânica dos Solos da mesma universidade, objetivando validar métodos de prevenção a desastres hidrológicos, inundações e escorregamentos. Esses métodos são baseados em medidas não estruturais, como por exemplo, o mapeamento, monitoramento e a compreensão de fenômenos hidrossedimentológicos. Para tanto, utilizam diversos modelos que simulam áreas suscetíveis a inundações e estabilidade de encostas, associados a monitoramentos e levantamentos em campo.

A bacia hidrográfica do Rio dos Cedros foi escolhida pelo projeto acima citado por ser considerada uma área de interesse científico, tendo em vista a significativa ocorrência de desastres hidrológicos evidenciados durante a tragédia de novembro de 2008. Nesse período as chuvas intensas provocaram escorregamentos e inundações em diversos municípios de Santa Catarina. De acordo com dados da Defesa Civil do município de Rio dos Cedros, 90% da população foi diretamente afetada pelo evento, sendo que as inundações foram mais evidenciadas na área urbana e os escorregamentos na área rural. Dados da prefeitura municipal e relatos de moradores demonstram que frequentemente o município sofre perdas econômicas e sociais ocasionadas por esses desastres.

Sendo assim, a modelagem com o SHALSTAB foi aplicada na bacia hidrográfica do Rio Cunha, uma sub-bacia da bacia do Rio dos Cedros, localizada na área rural do município. Essa bacia foi escolhida com base na avaliação realizada por pesquisadores após o evento de 2008, onde foi evidenciado o maior número em ocorrência

e amplitude dos movimentos de massa. Tais pesquisadores ao avaliarem os aspectos geológicos e geomorfológicos desses movimentos, consideraram tais fenômenos como naturais, associados as características do relevo e as intensas chuvas. Dentre esses fenômenos, identificaram os fluxos de detritos como os de maior incidência (GOERL et al., 2009), o que justifica a escolha desta área para a realização de simulações com o modelo SHALSTAB, uma vez que o mesmo não considera fatores antrópicos no condicionamento dos escorregamentos e, além disso, o mapeamento desses fenômenos nessa área possibilita a validação do modelo.

Quanto a tipologia dos escorregamentos, sabe-se que o modelo é favorável ao mapeamento dos escorregamentos translacionais, no entanto a existência desses fenômenos pode desencadear movimentos de massa denominados corridas ou fluxos de detritos (GUIDICINI e NIEBLE, 1984; SANTOS e VIERIA, 2009), e segundo Fernandes et al., (2001), Guidicini e Nieble (1984) e Wicander, Monroe e Peters (2009) isto ocorre em função do excesso de água. Além disso, mapeamentos de suscetibilidade a escorregamentos translacionais já foram realizados nessa bacia por meio de outro modelo de estabilidade, sendo que os resultados obtidos mostraram-se coerentes com a identificação em campo (MICHEL; GOERL; KOBAYAMA, 2010).

O presente estudo aborda um tema atual e de relevância social, tendo em vista a magnitude dos danos que os escorregamentos vêm causando no mundo. Segundo Fernandes et al. (2001) os escorregamentos são fenômenos complexos e interdisciplinares, sendo imprescindível o seu entendimento para que medidas preventivas e eficazes possam ser elaboradas. Logo, torna-se necessário o incentivo econômico de órgãos públicos e o interesse de pesquisadores para que mais pesquisas relacionadas ao assunto possam ser elaboradas.

Neste contexto, o estudo engloba conhecimentos de mecânica dos solos e hidrologia para o entendimento e previsão dos escorregamentos. A metodologia utilizada foi elaborada de forma a identificar os locais no relevo

suscetíveis à ocorrência desses fenômenos, bem como verificar a relação de fatores ambientais (parâmetros topográficos, geotécnicos, de uso e ocupação do solo) na sua deflagração. Para tanto, o modelo SHALSTAB foi empregado com os dados de entrada referentes ao solo, determinados em laboratório e em campo, possibilitando assim, uma melhor representação da área de estudos. Como resultado final é apresentado um mapa de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais. Desta forma, a modelagem realizada representa uma ferramenta eficiente para atuar na prevenção e mitigação de desastres naturais, compondo uma metodologia que pode ser utilizada em outros municípios, servindo também como subsídio aos órgãos públicos.

Evidencia-se que esta pesquisa deu suporte ao projeto “Prevenção e Mitigação de Desastres Hidrológicos na Bacia do Rio dos Cedros – SC”, principalmente por meio da obtenção dos dados geotécnicos dos solos presentes na mesma, os quais foram utilizados por Rocha (2011) e Michel (2011) como parâmetros de entrada nos modelos FLO-2D, SHALSTAB e SINMAP (*Stability Index Mapping*), objetivando estudar áreas de instabilidade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Identificar e caracterizar as áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais na bacia hidrográfica do Rio Cunha.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a área de estudo através de mapas temáticos (modelo digital de elevação, declividade, uso e ocupação do solo e geotécnico preliminar);
- Identificar os movimentos de massa presentes na bacia;
- Definir a unidade geotécnica suscetível à ocorrência dos movimentos de massa;

- Avaliar os parâmetros físicos e de resistência ao cisalhamento do solo que compõe a unidade geotécnica suscetível, por meio de ensaios laboratoriais;
- Identificar áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais com o modelo SHALSTAB;
- Comparar as áreas de instabilidade simuladas pelo modelo SHALSTAB com os mapas temáticos;
- Verificar a influência dos parâmetros dos solos determinados em laboratório e em campo na identificação de áreas instáveis pelo SHALSTAB.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mecânica dos Movimentos de Massa

Este item apresenta uma revisão bibliográfica simplificada a respeito da classificação dos solos e dos diversos tipos de movimentos de massa, enfatizando os escorregamentos translacionais. São abordados, além da definição e tipologia, fatores condicionantes à ocorrência desses fenômenos e os mecanismos de ruptura.

2.1.1 Classificação dos solos

A classificação dos solos possibilita prever o seu comportamento de forma a orientar análises e investigações de determinados problemas de engenharia. São inúmeros os métodos de classificação de solos, alguns são em função da sua origem, outros da estrutura, da evolução, da presença de matéria orgânica, entre outros. Os sistemas de classificação normalmente utilizados no Brasil empregam os índices de *Atterberg* e a granulometria para classificar o solo, entre estes cita-se a classificação unificada USCS (*Unified Soil Classification System*). Além disso, quanto a sua origem, os solos são classificados em dois grandes grupos; solos residuais e solos transportados (PINTO, 2002).

Nogami e Villibor (1994) abordaram, em seus estudos, um método de classificação voltado para solos tropicais, que classifica os solos em lateríticos e não lateríticos pela metodologia MCT (Miniatura Compactado Tropical). Outra forma de classificar o solo é de acordo com as suas características pedológicas, ou seja, analisando os perfis de solos gerados por processos de pedogênese na rocha de origem. Os perfis são divididos em horizontes os quais apresentam características geotécnicas diferenciadas (HIGASHI, 2002).

No caso de grandes áreas, uma maneira de se prever o comportamento do solo é por meio do mapeamento geotécnico, sendo uma ferramenta útil na gestão do meio físico. Resulta na elaboração de um mapa ou carta

geotécnica, que pode ser considerado uma forma significativa da representação geológica do ambiente, (UNESCO, 1976 *apud* HIGASHI, 2006). HIGASHI (2006) cita que diversas metodologias de mapeamento geotécnico vêm sendo desenvolvidas para determinar também o comportamento geomecânico dos solos.

Davison Dias (1995) desenvolveu uma metodologia de mapeamento geotécnico para grandes áreas em solos tropicais. Esta metodologia define que, a partir de informações pedológicas, litológicas e topográficas (curvas de nível), é possível obter um mapa de estimativas de unidades geotécnicas. Segundo os preceitos desta metodologia o mapa litológico é elaborado a partir de interpretações do mapa geológico, representando o tipo de rocha predominante. As cartas topográficas, disponibilizadas em escalas maiores que os mapas geológicos e pedológicos, orientam na delimitação das unidades, uma vez que, na análise do relevo é possível identificar os locais onde podem ocorrer mudanças entre os tipos de solos. Salienta-se, no entanto, que os limites das unidades após definidos devem ser constatados por meio de investigações em campo, como por exemplo, sondagens a trado.

Segundo Davison Dias (1987) a investigação pedológica é importante, pois em alguns casos o substrato rochoso pode encontrar-se em profundidades elevadas, com uma espessa camada de solo laterítico sobrejacente, assim, ele não proporciona informações sobre os solos superficiais, relevantes em determinadas situações. No entanto, através da geologia é possível supor a granulometria do solo residual e transportado, bem como identificar os minerais presentes.

De acordo com Higashi (2006) o mapeamento geotécnico para fins de planejamento territorial tem considerado em suas análises diversos fatores do meio ambiente, como por exemplo, a erosão, a infiltrabilidade e em especial a estabilidade de encostas. Esse autor apresentou uma metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras, baseando-se no comportamento geotécnico e ambiental dos solos, onde caracterizou solos

de origem residual e sedimentar a partir de ensaios específicos.

2.1.2 Classificação dos movimentos de massa

Wicander, Monroe e Peters (2009) referem-se aos movimentos de massa como movimentos gravitacionais de massa, e os definem como a mobilização descendente de materiais pela encosta sob a influência da gravidade. Segundo Guidicini e Nieble (1984) esses fenômenos constituem movimentos de materiais, sejam estes terrosos, rochosos, ou uma combinação de ambos, independentemente da diversidade dos seus processos, causas, velocidades, formas, entre outras características.

Segundo Cunha et al. (1991) em regiões tropicais a ocorrência dos movimentos de massa está relacionada principalmente com a pluviosidade. No entanto, fatores como o relevo, características geológico-geotécnicas do local, a vegetação, a ação humana, entre outros, são também determinantes na deflagração desses fenômenos. De acordo com Fernandes e Amaral (1996), o parâmetro geomorfológico forma da encosta também é importante no condicionamento dos movimentos de massa, pois é a partir dele que se definem as formas côncavas, convexas ou retilíneas.

Profissionais de diversas áreas de atuação (geologia, engenharia, geografia, geomorfologia, entre outras) buscam compreender e classificar os movimentos de massa, tendo em vista a sua relevância na evolução das formas do relevo, bem como a sua importância econômica e social. Isso acarreta na heterogeneidade dos enfoques relacionados a esses fenômenos que, associados à complexidade dos processos envolvidos e à diversidade dos locais de sua ocorrência, dificultam as análises e as sínteses dos mesmos, o que resulta na existência de diversos sistemas classificadores divergentes entre si. Alguns autores baseados em suas experiências descreveram e definiram diferentes classificações para os movimentos de massa, sendo essas de aplicabilidade regional (GUIDICINI; NIEBLE, 1984). De acordo com Wicander, Monroe e Peters (2009) esses fenômenos são

geralmente classificados em função da velocidade do movimento (rápido ou lento), do tipo do movimento (especialmente queda, escorregamento ou fluxo) e do material envolvido (rocha, solo ou detritos).

Dentre as inúmeras classificações, Tominaga (2009) menciona que internacionalmente destacam-se àquelas elaboradas por Varnes (1978) e, nacionalmente citam as de Freire (1965), Augusto Filho (1992) e de Guidicini e Nieble (1984). Essa última é a mais utilizada no Brasil (GOMES, 2006), e segundo Raimundo (1998) compõe um importante trabalho relacionado ao tema escorregamento. Varnes (1958 *apud* GUIDICINI; NIEBLE, 1984) sugere uma escala de velocidades para a classificação dos movimentos de massa, que foram divididos em: desmoronamentos, escorregamentos e fluimentos. Em Varnes (1978) os movimentos são separados em classes em função do tipo do movimento e do material transportado: quedas, desabamentos, deslizamentos (rotacional e translacional), espalhamentos laterais, corrida e complexo.

Guidicini e Nieble (1984) elaboraram, com base na classificação de Freire (1965) associada a outros estudos, uma tabela que ilustra, além das tipologias dos movimentos de massa, uma síntese das suas definições e características (Anexo I).

Terzaghi (1952) define os escorregamentos como movimentos rápidos de porções do terreno, sejam estas constituídas por rochas, solos residuais ou sedimentos, que se deslocam para baixo ou para fora da encosta. Esse autor estima que as velocidades de avanço desses movimentos inicialmente aumentam de forma rápida, de zero a 0,3 metros em uma hora, decrescendo a partir de então até atingir um valor ínfimo. Contudo, Guidicini e Nieble (1984) citam que velocidades superiores a esse limite podem ser alcançadas e que estas dependem da inclinação da superfície, do escorregamento, da causa da movimentação e do tipo do terreno. Observa-se, por exemplo, os terrenos que apresentam superfície inclinada, coesão e atrito interno elevados, neste caso os movimentos ocorrem de forma brusca. Wicander, Monroe e Peters (2009) citam que a velocidade dos escorregamentos pode

variar de extremamente lenta e moderada, relacionada aos escorregamentos rotacionais, a muito rápida, associada aos translacionais. Além disso, são movimentos de curta duração, com plano de ruptura bem definido (CUNHA et al. 1991; FERNANDES; AMARAL, 1996).

Segundo Guidicini e Nieble (1984) para que ocorra um escorregamento é necessário, basicamente, que a resistência ao cisalhamento do material seja igual às tensões cisalhantes atuantes ao longo da provável superfície de ruptura. De acordo com Cunha et al. (1991) a geometria das superfícies de ruptura dos escorregamentos pode ser circular, planar ou em cunha, dependendo da estrutura e da presença de planos de fraqueza nos materiais envolvidos. Neste contexto, Augusto Filho (1992) classifica os escorregamentos em: i) circulares, relacionados a solos espessos, homogêneos e rochas fraturadas; ii) planares, associados a solos pouco espessos, bem como solos e rochas com um plano de fraqueza; iii) em cunha, relacionados a solos e rochas que apresentam dois planos de fraqueza. Guidicini e Nieble (1984) dividem os escorregamentos em função do tipo de movimento: rotacionais para movimentos de rotação e translacionais para movimentos de translação.

De acordo com Varnes (1978), nos movimentos rotacionais geralmente a superfície de ruptura se manifesta em forma côncava. Segundo Guidicini e Nieble (1984) nestes escorregamentos em análises de estabilidade, assume-se que a ruptura do material ocorre ao longo de uma superfície em forma de arco de circunferência por meio de movimentos de rotação em torno de um eixo central. Esta superfície é aquela que apresenta menor resistência ao deslocamento da massa em relação às demais. Em solos mais homogêneos, por exemplo, algumas argilas, a cunha de ruptura se aproxima muito da forma circular, já em materiais heterogêneos a cunha poderá apresentar-se aplainada disposta na horizontal ou vertical.

Para Wicander, Monroe e Peters (2009) os escorregamentos rotacionais ocorrem em materiais de consolidação ineficiente e, geralmente, estão associados à remoção do apoio do material na sua base, sendo

comumente evidenciados em locais de cortes para a construção de estradas e residências. Segundo Fernandes e Amaral (1996) a erosão fluvial na base da encosta também ocasiona estes fenômenos. Vargas (1966 *apud* GUIDICINI; NIEBLE, 1984), baseado em ocorrências, menciona que estes fenômenos estão presentes nas encostas brasileiras e, geralmente, movimentam o manto de alteração. Ainda, segundo Guidicini e Nieble (1984) o escorregamento do Monte Serrat, deflagrado em 1928 na cidade de Santos, ocorreu ao longo de uma superfície circular em camadas espessas de solos residuais e compõe um exemplo de escorregamento rotacional.

Os escorregamentos translacionais apresentam superfície de ruptura planar condicionada à anisotropia acentuada do material, ou seja, aos planos de fraqueza ou descontinuidades mecânicas e hidrológicas presentes no maciço (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; TOMINAGA, 2009). Nestes fenômenos é plausível encontrar superfícies de ruptura na interface solo-rocha, sendo ainda comumente associados a eventos pluviométricos intensos (SELBY, 1993; FERNANDES; AMARAL, 1996). De acordo com Guidicini e Nieble (1984) a camada de solo em contato direto com o leito rochoso, geralmente constitui o plano de menor resistência. Selby (1993) faz menção à diferença de permeabilidade nos materiais como parâmetro associado à ocorrência deste tipo de fenômeno e o aumento da poro-pressão devido a longos períodos chuvosos. Estes escorregamentos podem ocorrer em encostas de alta ou baixa declividade, podendo apresentar comprimentos de até milhares de metros, diferenciando-se dos rotacionais, os quais apresentam comprimentos limitados e são normalmente encontrados em encostas íngremes (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

Fernandes e Amaral (1996) se referem aos escorregamentos translacionais como movimentos rasos por apresentarem superfície de ruptura normalmente entre 0,5 e 5,0m de profundidade. Wolle e Carvalho (1989), em investigações na Serra do Mar, identificaram escorregamentos translacionais em colúvios de até 3m de espessura e rotacionais em solos residuais espessos, sendo

estes fenômenos associados à erosão e aos cortes nas encostas.

Os escorregamentos translacionais, segundo Guidicini e Nieble (1984), podem ser divididos em: i) escorregamentos translacionais de solos; ii) de rocha; iii) de solos e de rocha e iv) remontante. Em i) o solo desliza de forma tabular, em geral, mobilizando o manto de alteração do maciço, o qual, no Brasil pode atingir elevadas espessuras (até mesmo superiores a 100m). Além de solos, podem mobilizar blocos de rocha de alteração. Um exemplo de escorregamento do tipo translacional de solo foi verificado na encosta da Caneleira, em Santos, no ano de 1956 por Vargas (1966) e Vargas e Pichler (1957), onde foi mobilizada uma parcela de material de pequena espessura próxima à superfície do maciço rochoso (GUIDICINI; NIEBLE, 1984). Estes autores mencionam ainda que os escorregamentos translacionais de solos podem adquirir características de corridas, quando há aumento do teor de água ou rastejo, quando se acumulam na base da encosta. Nesta pesquisa, a ocorrência de escorregamentos translacionais associados à deflagração de corridas merece maior atenção.

Segundo Wicander, Monroe e Peters (2009), corridas constituem movimentos onde “o material flui como um fluido viscoso ou exibe movimentos plásticos”, apresentando velocidades que variam de extremamente lenta a extremamente rápida. Esta classificação difere daquela apresentada por Guidicini e Nieble (1984) por considerar como corrida os movimentos de rastejo e a solifluxão, correspondentes a velocidade extremamente lenta e lenta, respectivamente.

O movimento de corrida de solos e rochas pode fluir como um líquido pela presença de água, por vibrações ou por amolgamento, no caso de argilas sensíveis. As corridas podem ser divididas de acordo com Guidicini e Nieble (1984) em: i) corridas de terras, onde os movimentos ocorrem devido ao encharcamento do solo e estão relacionados à resistência do material, podendo ocorrer em locais de baixa declividade; ii) corridas de areia ou silte nas encostas naturais, ocorrem normalmente na presença de

leitos de areia com características específicas; iii) corrida de lama, que mobiliza, em geral, solos e rochas pouco consolidados em estado de saturação e fluidez. Ocorrem em encostas de alta declividade, cuja extensão permite o desenvolvimento do fenômeno, que é iniciado por movimentos bruscos na forma de escorregamentos e iv) avalanches de detritos, que constituem movimentos extremamente fluidos, associados a enchentes e tempestades, onde os cursos d'água são responsáveis pela remoção dos solos.

Segundo Cunha et al. (1991) as corridas de massa estão associadas a quantidades extremas de chuva. Varnes (1978) se refere às corridas como fluxos, dividindo-os em fluxos de rochas, fluxos de detritos (*debris flow*) e fluxos de terras. Sendo os fluxos de detritos correspondentes a mobilização de materiais com alto percentual de fração grosseira.

Gostner et al. (2008) definem que um fluxo de detritos é composto por três partes: a ruptura, o transporte e a deposição. Em Guidicini e Nieble (1984) a forma de uma corrida de terra é dividida em: i) raiz, correspondente a região onde se encontra o material a ser mobilizado, que, em geral, apresenta a forma circular; ii) corpo de corrida, de forma alongada e estreita, por onde o material é transportado e iii) base ou área de acumulação (Figura 1).

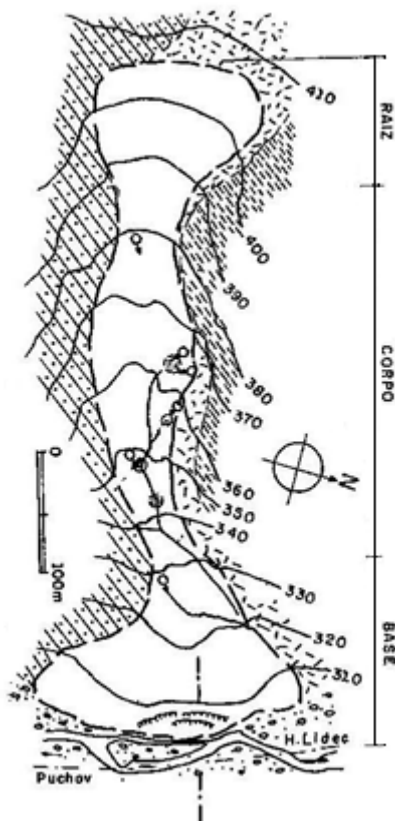


Figura 1 – Elementos que constituem uma corrida de lama
Fonte: Modificado de Guidicini e Nieble (1984)

Autores como Lacerda e Sandroni (1985 *apud* RAIMUNDO, 1998) ao caracterizarem a ocorrência de corrida de lama (*mud flow*) no município de Nova Friburgo, relacionaram o evento inicialmente a movimento de rastejo, que, em seguida adquiriu aspectos de escorregamento do tipo translacional.

Guidicini e Nieble (1984) mencionam a catástrofe de 1974 na Serra de Maranguape (Ceará), onde a ocorrência de um escorregamento translacional, precedido por elevados índices pluviométricos deu início a uma avalanche de detritos (*debris avalanche*), envolvendo solos e rochas, que avançou por 1600m em um desnível de

460m. Neste evento, o escorregamento translacional mobilizou o solo em torno da cota 720m, próximo ao topo da serra de maciço de granitóide, onde o terreno apresentava inclinação de aproximadamente 40°.

No evento pluviométrico extremo de novembro de 2008, diversos municípios do Vale do Itajaí, no Estado de Santa Catarina, sofreram com movimentos de massa associados à intensidade pluviométrica (GRANDO et al., 2009), muitos dos quais foram classificados como fluxo de detritos (*debris flow*). Dentre os municípios atingidos destaca-se o Rio dos Cedros que, segundo investigações de campo, apresentou 56% dos fenômenos caracterizados como fluxo de detritos, sendo ainda evidenciados, porém, em menor quantidade, movimentos complexos, escorregamentos rotacionais e translacionais. Nestas análises, a ocorrência dos fluxos de detritos foi também relacionada à presença de “encostas declivosas, longas e vales encaixados”. Por sua vez, os escorregamentos rotacionais foram identificados em depósitos coluviais presentes na base das encostas (GOERL et al., 2009).

2.2 Mapeamento dos Escorregamentos

Neste item destacam-se algumas metodologias relacionadas ao mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos (mapeamento de perigo) e aos riscos associados a eles (mapeamento de risco). Ênfase maior é dada aos métodos de previsão, em especial aos que utilizam modelos computacionais em suas análises.

2.2.1 Métodos de previsão de escorregamentos

Os estudos para a previsão da ocorrência de escorregamentos vêm ganhando importância, tanto na área geomorfológica quanto na geotécnica. Inúmeras são as formas de compreensão e investigação desses fenômenos, o que compõe a elaboração de diversas metodologias. A maioria delas é voltada para a determinação das áreas mais suscetíveis a ocorrência do fenômeno, outras, no entanto, consideram além da possibilidade de ocorrência, os danos envolvidos (FERNANDES et al. 2001). Há ainda

aquelas que definem a probabilidade de ocorrência do fenômeno (ZAIDAN; FERNANDES, 2009).

Guzzetti et al. (1999) citam a relevância do mapeamento de áreas de perigo, na previsão de ocorrência de escorregamentos e na redução dos desastres associados a eles. Autores como Carrara et al. (1991) e Barros, Amaral e D'Orsi (1992) empregam em suas análises mapas de perigo (*hazard*). Soeters e Van Westen (1996) classificaram os métodos de mapeamento de área de perigo em quatro grupos: i) inventário histórico; ii) heurística; iii) determinística e iv) estatística. No entanto, segundo Fernandes et al. (2001), os principais procedimentos na previsão de áreas suscetíveis a escorregamentos são: i) análise a partir da distribuição dos deslizamentos no campo; ii) análises a partir de mapeamentos geomorfológicos e/ou geotécnicos; iii) modelos com bases estatísticas e iv) modelos determinísticos.

Segundo Fernandes et al. (2001), autores como Brand (1988) e Augusto Filho e Wolle (1996), elaboraram em seus trabalhos mapas de risco de escorregamento, ao caracterizar, além do perigo, os danos sociais e econômicos ocasionados pelo fenômeno. Tominaga (2009) se refere a dificuldade em se compor mapas de risco, no entanto faz menção a Cerri (1993), que gerou um mapa de risco geológico combinando o mapa de suscetibilidade com o mapa de uso e ocupação do solo. Anbalang et al. (1993) menciona a importância de mapas de risco no gerenciamento, avaliação e mitigação das catástrofes. Trabalhos como os de Barroso e Barroso (1996), Mendonça et al. (1996) e Alves e Barroso (1999), determinaram locais suscetíveis a ocorrência de escorregamentos baseados em unidades geotécnicas, definidas a partir de mapas geológico geotécnicos.

O desenvolvimento tecnológico de SIGs contribuiu de forma significativa ao surgimento de novos métodos de análise e previsão de instabilidade. Em SIG é possível correlacionar e sistematizar informações em diferentes escalas, obtendo mapas de suscetibilidade de acordo com o enfoque desejado (CHRISTOFOLETTI, 1999). Carrara et al. (1991) elaboram mapas de risco correlacionando atributos

topográficos (declividade, orientação e forma da encosta), gerados a partir de um modelo digital de elevação (MDE), bem como características de vegetação ou litologia com os locais de ocorrência de escorregamentos, identificando, desta forma, a relevância de cada um na distribuição espacial destes fenômenos. Dias (2006) salienta que os SIGs podem ser incorporados com modelos computacionais matemáticos que auxiliam na determinação de áreas favoráveis à ocorrência destes fenômenos.

A utilização dos modelos computacionais na prevenção de escorregamentos vem ganhando importância no meio científico, por possibilitar a elaboração de hipóteses e estudos de previsão e por gerar respostas imediatas perante a necessidade de tomadas de decisões (FERNANDES; AMARAL, 1996; CHRISTOFOLETTI, 1999). No entanto, possui limitações associadas à impossibilidade em reproduzir fielmente o comportamento da natureza, tendo que adotar simplificações na modelagem (GOMES, 2006). Neste contexto, o emprego de modelos matemáticos vem se destacando (FERNANDES et al., 2001; 2004).

Segundo Ramos et al. (2002), a modelagem matemática é capaz de prever a distribuição espacial e temporal dos escorregamentos dentro de uma determinada área, o que faz com que medidas preventivas e mitigatórias possam ser implementadas antes da ocorrência do fenômeno. Desta forma, as perdas de vidas e os prejuízos materiais associados aos mesmos podem ser diminuídos.

Conceitualmente, os modelos matemáticos são baseados em equações físicas, as quais buscam reproduzir os sistemas ambientais com o intuito de entender o comportamento dos processos que regem os fenômenos existentes (BEVEN; KIRKBY, 1979). De acordo com Christofolletti (1999) estes são divididos em: i) determinísticos; ii) probabilísticos ou estocásticos e iii) otimização.

Segundo Fernandes e Amaral (1996) os modelos matemáticos determinísticos são importantes por “permitirem testes de hipóteses bem específicas, seja na escala da encosta quanto na escala da bacia de drenagem inteira”. Este tipo de modelo não permite a interferência do

operador no resultado final, sendo a sua subjetividade relacionada à escolha dos parâmetros de entrada na modelagem. Portanto, os resultados obtidos são baseados em processos físicos e não nas técnicas de SIGs. Fernandes et al., (2001) enfatizam a utilização de modelos matemáticos determinísticos que consideram, em suas análises, fatores topográficos, como por exemplo o modelo SHALSTAB na previsão específica de escorregamentos translacionais.

2.2.2 Modelos de previsão

A análise de estabilidade das encostas associada à espacialização das informações geradas pela mesma, possibilita, além do entendimento dos mecanismos e dos fatores condicionantes dos escorregamentos, a identificação dos locais suscetíveis a ocorrência desses fenômenos (GOMES, 2006). Para tal, esse mesmo autor baseado em estudos de Van Ash et al. (1993) cita a utilização de modelos numéricos de simples calibração que buscam reproduzir fisicamente a influência da topografia, de parâmetros do solo e de fatores desencadeadores, como por exemplo a chuva sobre os movimentos de massa. Neste contexto, vários modelos relacionados à previsão de escorregamentos translacionais vêm sendo desenvolvidos baseados na teoria do talude infinito (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

Citam-se os modelos SINMAP (Stability Index Mapping) e SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability Model), desenvolvidos na década de 1990 por Pack e por Montgomery e Dietrich, respectivamente, os quais integram um modelo hidrológico de estado de equilíbrio permanente (*steady state*) a um de estabilidade de encosta baseado na teoria do talude infinito, com o intuito de avaliar e quantificar a estabilidade de um local, relacionada a escorregamentos translacionais. São modelos com base física semelhante, que utilizam como dados de entrada o mapa de declividade e o de área de contribuição, gerados a partir do MDE, bem como parâmetros hidrológicos e dos solos. A diferença entre eles está relacionada na forma de quantificar a instabilidade. O SINMAP é um modelo

probabilístico que define o índice de estabilidade (SI) como a probabilidade de uma região ser estável, assumindo distribuições uniformes de parâmetros sobre intervalos de incerteza, os quais estão associados aos métodos de determinação, à variabilidade espacial e à necessidade de regionalização dos parâmetros ligados ao solo e a precipitação. O SHALSTAB é determinístico e quantifica a instabilidade do terreno em termos de chuva crítica efetiva necessária para desencadear a instabilidade induzida pela poro-pressão (MEISINA; SCARABELLI, 2007).

Em um estudo comparativo entre SINMAP e SHALSTAB, realizado na Itália, Meisina e Scarabelli (2007) observaram que ambos os modelos definiram o mesmo local como mais suscetível a escorregamentos translacionais. Mencionam também que os modelos demonstraram eficiência na distinção entre as áreas de alto risco e baixo risco a esse tipo de fenômeno. Em uma análise individual, os autores consideraram que o SINMAP demonstrou êxito na identificação dos locais afetados pelos escorregamentos, identificando 78% das ocorrências. No entanto, a quantidade de áreas classificadas como instáveis foi superestimada. Quanto ao modelo SHALSTAB, os resultados obtidos mostraram-se coerentes com a realidade da área de estudo.

Para Dietrich e Montgomery (1998) o modelo SHALSTAB vem se destacando dentre os modelos matemáticos previstos na análise de estabilidade de encosta. Guimarães (2000) em suas análises realizadas em duas bacias hidrográficas no município Rio de Janeiro, atesta que este modelo compõe uma metodologia promissora na definição de áreas suscetíveis a escorregamentos rasos. Tal argumentação foi baseada em aferições das áreas definidas como instáveis pela modelagem com os locais onde foram evidenciados movimentos de massa, e também com os resultados de outras metodologias aplicadas na mesma área de estudo para o mesmo fim. Salienta-se ainda que os escorregamentos citados ocorreram após intensas chuvas em 1996.

2.3 Modelo SHALSTAB

O SHALSTAB compõe um modelo eficiente na previsão e simulação de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais, incorporando, em suas análises, parâmetros topográficos, hidrológicos e propriedades do solo. Foi desenvolvido com base em estudos de Montgomery e Dietrich (1994), sendo implementado por estes mesmos autores no ano de 1998, em linguagem AML (*ArcInfo Macro Language*), o que possibilita a sua utilização em *softwares* de geoprocessamento do tipo *ArcInfo* (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

A sua fundamentação matemática é composta por dois módulos: um hidrológico e outro de estabilidade de encosta. O módulo hidrológico é baseado nos estudos realizados por Beven e Kirkby (1979) e O'Loughlin (1986) e objetiva identificar as zonas de saturação no relevo. O módulo de estabilidade de encostas procede da teoria da estabilidade de taludes infinitos, considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

O SHALSTAB utiliza um SIG como ferramenta de elaboração de mapas tornando possível a espacialização dos dados, no entanto, a definição dos locais é tarefa do modelo matemático. Segundo Dietrich e Montgomery (1998), o modelo calcula o grau de suscetibilidade a escorregamentos translacionais para cada célula (*pixel*) dentro de uma malha (*grid*), obtida a partir de um MDE.

Fernandes et al. (2001) destacam que uma das principais características deste modelo é considerar a topografia da área de estudo como fator determinante na deflagração dos escorregamentos. Sendo assim, o modelo incorpora em suas análises a declividade e a área de contribuição da bacia de forma espacializada, contudo, as variáveis referentes ao solo (coesão, ângulo de atrito, densidade e espessura) são mantidas constantes ao longo da área. Estes autores mencionam que muitas metodologias de previsão de risco e ou suscetibilidade a esse tipo de movimento de massa desconsideram a área de contribuição. No entanto, este parâmetro é importante por

incorporar ao modelo a influência das porções côncavas do relevo (*hollows*) nos caminhos que a água percorre. Ramos et al. (2003) mencionam a relevância da área de contribuição na previsão de áreas de instabilidade principalmente nos *hollows*, os quais são identificados como locais potenciais de saturação e, logo, de instabilidade.

A partir da automatização deste modelo, diversos estudos foram realizados em regiões de clima temperado, no oeste dos Estados Unidos (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998) e no Sul da Europa – Itália (MEISINA; SCARABELLI, 2007), comprovando a sua eficácia. No Brasil foi utilizado pela primeira vez em bacias hidrográficas no Estado do Rio de Janeiro (GUIMARÃES, 2000; FERNANDES et al., 2004), onde também foi verificada sua precisão em diferentes escalas topográficas (GOMES et al., 2004). Este modelo foi ainda aplicado em outras regiões do país, no Estado de Minas Gerais (REDIVO et al., 2004; RAMOS et al., 2002), ressaltando-se estudos pioneiros em bacias hidrográficas urbanas (ZAIDAN; FERNANDES, 2009).

Na Bahia, Ramos et al. (2007) implementaram o modelo com um algoritmo que considera a variação espacial dos parâmetros do solo. Em Santa Catarina, Higashi e Michel (2010) determinaram, em laboratório, os parâmetros do solo considerados na modelagem.

Gomes (2006), ao analisar a correspondência dos escorregamentos ocorridos em campo, mapeados por meio de fotos aéreas, com o mapa de instabilidade gerado pelo SHALSTAB, demonstra a eficiência dos resultados. Nas simulações realizadas pelo autor, desconsiderando a coesão do solo, aproximadamente 97% dos escorregamentos mapeados encontraram-se nas classes consideradas instáveis pelo modelo, no entanto, considerando a coesão 99% dos escorregamentos foram previstos.

Ramos et al. (2002) demonstraram que no estado de Minas Gerais o mapeamento de áreas susceptíveis realizado com o modelo SHALSTAB mostra-se satisfatório mesmo com a utilização de dados em escala de 1:50.000, considerada pequena para esse fim. Gomes (2004)

considera que a escala de 1:50.000 pode ser utilizada somente para determinações preliminares, sendo indispensável uma escala de 1:10.000 para melhorar a eficácia do modelo em áreas críticas. Sendo assim, uma vez que não se dispõe de dados planialtimétricos para todas as regiões do Brasil em escalas refinadas é possível utilizar esta ferramenta como subsídio no mapeamento.

No entanto, é essencial conhecer tanto as potencialidades quanto as limitações e deficiências deste modelo, para que não ocorram distorções nas análises dos resultados e para que o mesmo possa representar as características reais da área de estudo. Para o SHALSTAB os escorregamentos ocorrem, em geral, em regiões de alta declividade, onde o relevo é convergente e sem a presença de drenagem. Isso porque as zonas convergentes representam locais de acúmulo de solo e de água, caso não houver um canal. Este modelo diminui a sua eficiência em presença de “afloramento rochoso, falésias, precipícios e lençol freático profundo” (GUIMARÃES, 2000).

Tendo em vista tais restrições Zaidan e Fernandes (2009) desconsideraram os resultados obtidos nas regiões de topos e vales, pois estas áreas são consideradas respectivamente áreas de afloramento de rocha e planas, as quais foram classificadas pelo modelo como sendo áreas incondicionalmente instáveis.

Gomes (2006) e Fernandes et al. (2001) observaram que, em determinadas áreas consideradas pelo modelo como instáveis, não ocorreram escorregamentos como verificado em campo. Os autores descreveram que o modelo geralmente considera como instáveis as regiões formadas por paredões rochosos e/ou nas proximidades de divisores de água. Nestes locais, a declividade encontra-se próxima a vertical, onde já ocorreram escorregamentos e a cobertura do solo é delgada.

A eficiência do SHALSTAB depende basicamente da resolução em que o MDE foi construído, dos parâmetros físicos (RAMOS et al., 2007) e da resistência do solo. Assim, é possível melhorar o desempenho do modelo, se forem considerados na modelagem valores representativos das propriedades do solo (GOMES, 2006; RAMOS et al.,

2007), os quais podem ser determinados para cada área de estudo por meio de ensaios laboratoriais e de campo. Entretanto, na maioria das simulações, o que foi verificado é a utilização de valores retirados de referências bibliográficas. Em relação a possibilidade de incorporar ao modelo a variabilidade espacial das propriedades dos solos, Ramos et al. (2007) mostraram que há diferença entre os resultados gerados pelo SHALSTAB com e sem a variação espacial destes parâmetros.

Na simulação em que foi utilizada a variação espacial dos parâmetros do solo e onde foi considerada a influência da coesão, verificou-se um menor percentual de áreas instáveis em relação aos obtidos pelo método simples (sem coesão e sem a variação espacial dos parâmetros do solo). No entanto, ambos os métodos apresentaram maior frequência de áreas classificadas como instável quando relacionadas às áreas estáveis. Baseado neste estudo, os autores afirmam que em locais onde há maior disponibilidade e relevância de dados relativos às propriedades do solo os resultados gerados pelo SHALSTAB são mais significativos (GUIMARÃES et al., 2003). Estudos neste âmbito agregam confiabilidade ao modelo e contribuem na validação dessa ferramenta de fácil manuseio para locais com características geomorfológicas, climáticas, litológicas e de ocupações distintas (FERNANDES et al., 2001).

2.4 Estudos relacionados à bacia do Rio Cunha

O município de Rio dos Cedros vem sofrendo frequentemente com desastres hidrológicos associados a chuvas intensas, sendo os eventos mais marcantes aqueles dos anos de 1911, 1975, 1983, 1984, 1992 e 2008 (ROCHA; KOBİYAMA; SILVA, 2009).

A Figura 2, elaborada por Kobiyama et al. (2010) a partir de dados de estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), ilustra os valores anuais de precipitações do

período de 1942 a 2008, caracterizando a distribuição pluviométrica da área de estudos.

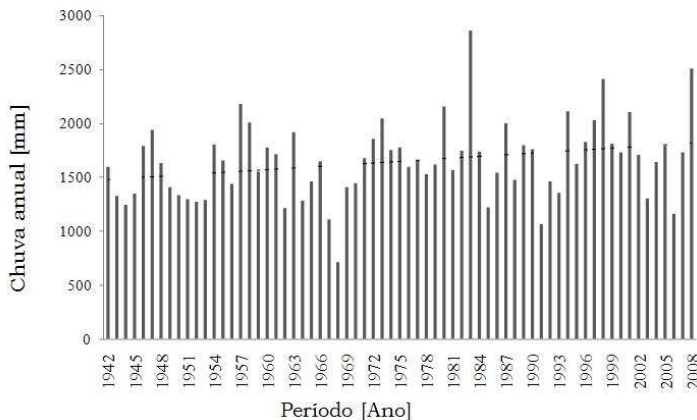


Figura 2 – Chuva anual em Rio dos Cedros de 1942 a 2008

Fonte: Adaptado de Kobiyama et al. (2010)

Observando esta figura é possível identificar as maiores precipitações anuais ocorridas no município, sendo as do ano de 1983, correspondente a uma chuva de $2.863\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, e a do ano de 2008, com a chuva de $2.059\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$.

Destaca-se que o evento extremo de 2008 foi marcado pela máxima precipitação ocorrida no mês de novembro, período caracterizado por inúmeros movimentos de massa e, portanto, relevante no contexto desta pesquisa. Rocha, Kobiyama e Silva (2009) caracterizaram este evento evidenciando a relação entre as intensas precipitações e os desastres ocorridos. Estes autores elaboraram, a partir de dados das estações da ANA e EPAGRI, um gráfico com a distribuição diária de precipitação para o mês de novembro, evidenciando que nos dias 22 e 23 ocorreram as maiores precipitações, totalizando $185,8\text{mm}$ do total mensal de $747,7\text{mm}$ (Figura 3).

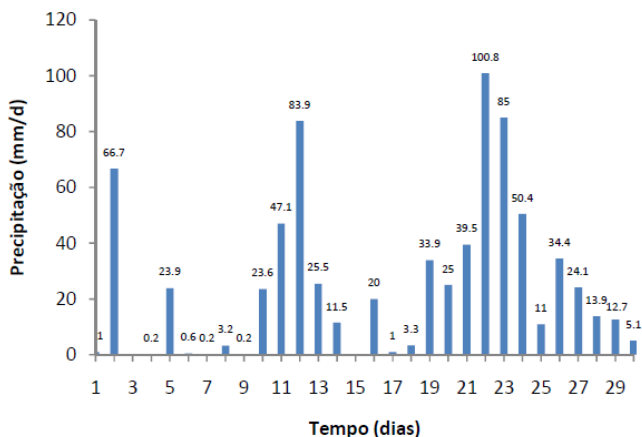


Figura 3 – Hietograma do mês de novembro de 2008

Fonte: Rocha, Kobiyama e Silva (2009)

Na bacia do Rio Cunha diversos movimentos de massa de grandes dimensões ocorreram no evento de novembro de 2008. Autores como Kobiyama et al. (2010) e Rocha (2011) realizaram estudos neste local em movimentos classificados pelo CEPED (2009) e por Goerl et al. (2009) como fluxos de detritos. Além dos fluxos de detritos, outros tipos de movimentos também foram identificados pelo CEPED (2009). A Figura 4 e a Figura 5 ilustram dois destes fenômenos, respectivamente denominados fluxo de detritos A e B. Kobiyama et al. (2010) citam que ambos os fluxos apresentam características geomorfológicas semelhantes, com profundidade média do solo de 15m, no entanto, um deles (fluxo de detritos - A) está inserido no talvegue e o outro (fluxo de detritos - B) distribuiu-se lateralmente a partir desta divisão, ou seja, sem confinamento topográfico. Na Figura 6 é possível visualizar, por meio das cicatrizes dos movimentos, a forma com que os fluxos de detritos A e B se desenvolveram no relevo.



Figura 4 – Fluxo de detritos – A
Fonte: CEPED (2009)

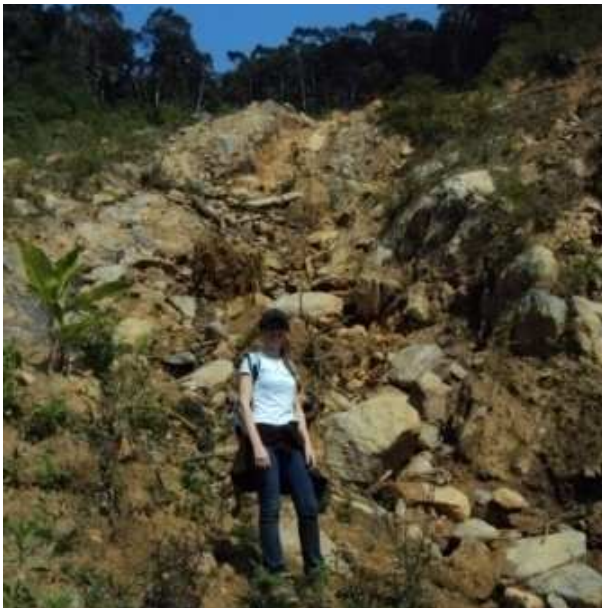


Figura 5 – Ilustração do ano de 2010 do fluxo de detritos – B

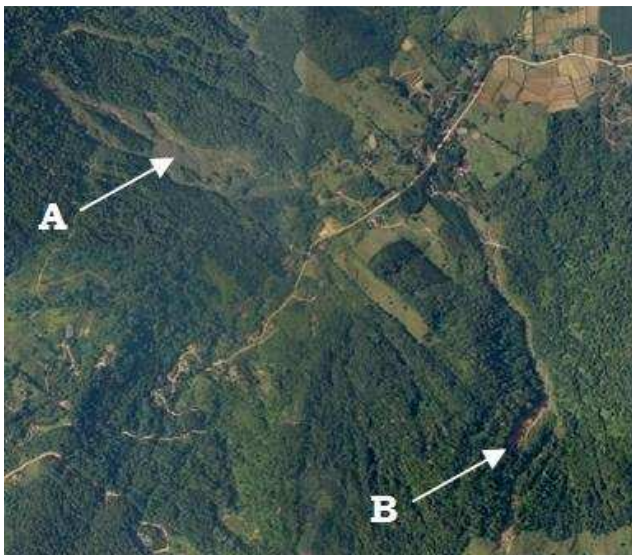


Figura 6 – Foto aérea dos fluxos de detritos A e B

Observa-se que em ambos (A e B) foi evidenciado no corpo da cicatriza formação de ilhas, nas quais não houve movimentação do material. Kobiyama et al. (2010) estimaram os volumes de material desagregado no topo destas cicatrizes (raízes), sendo estes de 55915m^3 e 61336m^3 , respectivamente, fluxo de detritos A e B. Segundo Rocha (2011) as rupturas que originaram os fluxos ocorreram nas declividades entre 20 a 30° (fluxo de detritos A) e entre 30 a 40° (fluxo de detritos B).

3 ÁREA DE ESTUDOS

3.1.1 Localização

A bacia hidrográfica do Rio Cunha, local de estudo desta pesquisa, com área de 16,13km², está inserida na região hidrográfica brasileira denominada como região hidrográfica do Atlântico Sul, de acordo com a Resolução nº 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2003). Segundo ANA (2012) esta região possui uma área de 185.856km² e destaca-se pela sua economia, expressiva população e relevância turística. É, também, formada pelas bacias hidrográficas dos rios que deságuam no trecho Sul do Atlântico, dentre as quais a do Itajaí, com 15.000km² é de grande relevância ao estudo de desastres (Figura 7).



Figura 7 – Localização da região do Atlântico Sul e da bacia do Itajaí

Mattedi et al. (2009) destacam que a região da bacia do Itajaí, possui entre as cidades brasileiras um dos maiores índices de desenvolvimento humano e apresenta alta vulnerabilidade frente aos desastres e recorrentes catástrofes geradas por inundações, movimentos de massa e enxurradas. Este fato se justifica pelas características naturais (intensa precipitação, solos frágeis e relevo acidentado) e sociais (derrubada da floresta e ocupação

desordenada das margens dos rios e encostas) intrínsecas à área. Estes autores elucidam o evento climático adverso de novembro de 2008, onde diversos municípios pertencentes a esta bacia, principalmente aqueles localizados nas regiões do médio vale e foz do rio Itajaí, decretaram estado de calamidade pública e situação de emergência diante dos desastres ocorridos.

A bacia do Rio Cunha situada na região do médio vale do Itajaí, pertence à porção sudoeste do município de Rio dos Cedros/SC, que de acordo com a Fundação Agência da Água do Vale do Itajaí (MATTEDI et al., 2009), está entre os municípios que decretaram estado de calamidade pública (Figura 8). Esta bacia compreende as coordenadas 26°41'S e 26°44'S de latitude, 49°17'W e 49°21'W de longitude. A sua distribuição hidrográfica é dada pelo rio Cunha, afluente do Rio dos Cedros e seus tributários (Figura 8). No evento de 2008 foi atingida por movimentos de massa de grandes dimensões, compondo, desta forma, uma área apropriada para o estudo destes fenômenos.

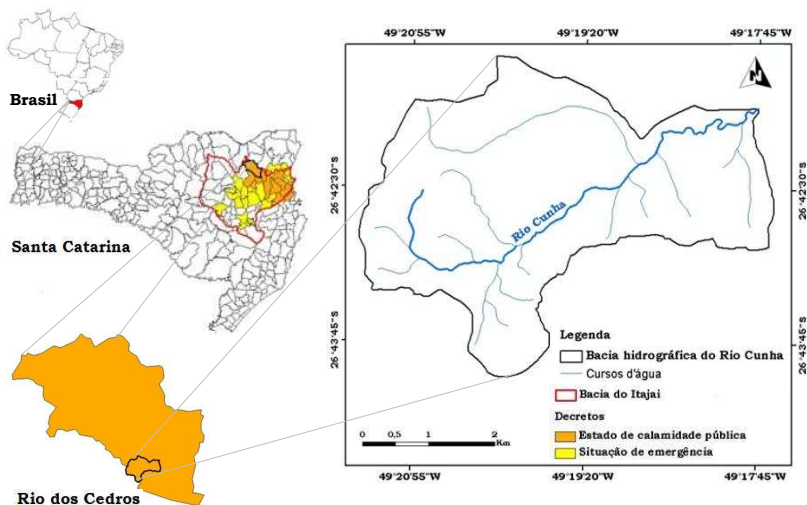


Figura 8 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Cunha

3.1.2 Vegetação e uso do solo

As características da cobertura vegetal nativa da região são descendentes de Floresta Ombrófila Densa, um dos tipos de formação constituinte do bioma Mata Atlântica. Suas principais espécies compreendem a canela-sassafrás (*Ocotea pretiosa*), canela-preta (*Ocotea Catharinensis*), canela-fogo (*Onyptocarya aschersoniana*), pau-óleo (*Copaifera Trapezifolia*) e peroba vermelha (*Aspidosperma olivaceum*), todas consideradas como madeira de lei. Além disso, há também espécies de qualidade destacando-se a bicuíba (*Virola oleifera*), aguai (*Chrysophyllum marginatum*), tapiá-guaçu (*Alchornea triplinervia*), alaranjeira-do-mato (*Sloanea guianensis*) e o baguaçu (*Talaumaovata Saint-Hilaire*) (SANTA CATARINA, 1986).

A classificação da vegetação e da cobertura e uso do solo da bacia do Rio Cunha, segundo IBGE (2003), encontra-se respectivamente ilustrada na Figura 9 e na Figura 10 por um mapa em escala 1:100.000, com projeção *Universal Transversa de Mercator* (UTM), *Datum* Horizontal SAD-69 e Vertical de Imbituba/SC. Os mapas ilustrados nesse estudo e cedidos pelo IBGE (2003) apresentam o sistema de referência acima mencionado.

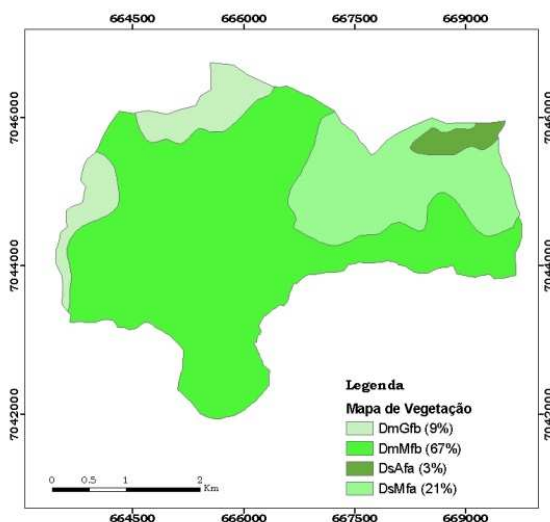


Figura 9 – Mapa de vegetação da bacia do Rio Cunha

Assim, a composição da vegetação é dada por:

- DmGfb – Floresta Ombrófila Densa, montana, sedimento gonduânico, formação florestal baixa;
- DmMfb – Floresta Ombrófila Densa, montana, rocha metamórfica, formação florestal baixa;
- DsAfa– Floresta Ombrófila Densa, sub-montana, sedimento gonduânico, formação florestal alta;
- DsMfa– Floresta Ombrófila Densa, sub-montana, rocha metamórfica, formação florestal alta.

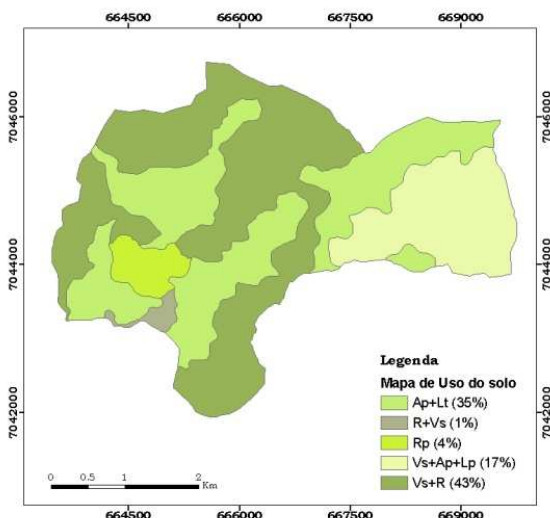


Figura 10 – Mapa de cobertura e uso da bacia do Rio Cunha

Assim, a composição da cobertura e uso do solo é descrito em função da predominância destes fatores:

- Ap+Lt– Pastagem, agricultura, fruticultura, pecuária reflorestamento e vegetação secundária;
- R+Vs– Reflorestamento e vegetação secundária;
- Rp– Reflorestamento;
- Vs+Ap+Lp– Pastagem, agricultura, fruticultura, pecuária e reflorestamento, vegetação secundária;
- Vs+R – Vegetação secundária e reflorestamento.

3.1.3 Clima

O clima que caracteriza a região é do tipo *Cfb*, ou seja, temperado úmido com verão temperado. A

temperatura média anual do município de Rio dos Cedros é de 22°C, sendo a precipitação média anual de 1.800mm (FRAGA, 2009).

3.1.4 Pedologia

Os solos presentes na área de estudo estão enquadrados em quatro unidades pedológicas dentre as definidas pelo IBGE (2003), que são denominadas segundo a classificação antiga do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. Uma é classificada como Podzólico Vermelho Amarelo Latossólico Álico (PVL_a4 e PVL_a5) e três como Cambissolo, diferenciados em álico (Ca38, Ca39 e Ca96), distrófico e álico (Cd2), e distrófico e eutrófico (Cd5 e Cd9). Nas siglas supramencionadas a letra maiúscula representa as classes dos solos (Podzólicos Vermelho-Amarelo Latossólico ou Cambissolo). A minúscula representa as características de fertilidade (álico, eutrófico e distrófico). O número representa informações referentes à granulometria, ao relevo e a outras peculiaridades. Dentre estas, cita-se a inclusão de solos, denominados solos associados, que apresentam um menor percentual de ocorrência dentro da classe mapeada.

Sendo assim, as unidades pedológicas existentes na bacia, bem como os seus percentuais de abrangência, são ilustrados no mapa da Figura 11, e na Tabela 2, consta uma descrição simplificada dessas unidades. Nesta tabela os solos citados em primeiro lugar são os predominantes e os subsequentes compõem os solos associados.

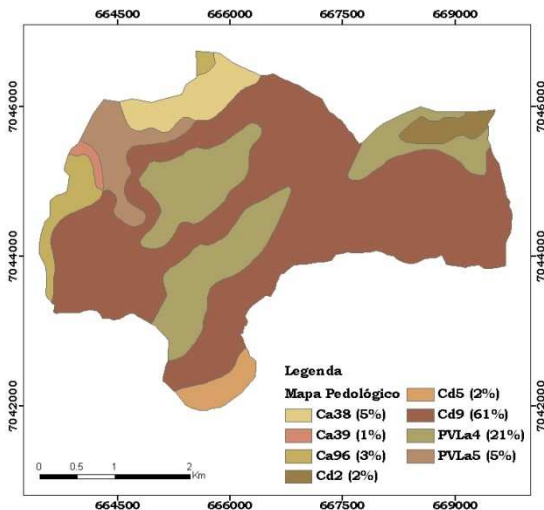


Figura 11 – Mapa pedológico da bacia do Rio Cunha

Tabela 2 – Descrição das unidades pedológicas presentes na bacia

Solo: PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO LATOSSÓLICO ÁLICO	
Unidade: PVL4 - Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico álico A moderado textura argilosa e muito argilosa mais Cambissolo álico Tb A moderado textura argilosa e muito argilosa relevo forte ondulado.	
Unidade: PVL5 - Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico álico A moderado textura argilosa e muito argilosa mais Podzólico Vermelho-Amarelo álico Tb A moderado textura média/argilosa e argilosa/muito argilosa mais Cambissolo álico Tb A moderado textura muito argilosa e argilosa relevo forte ondulado e ondulado.	
Solo: CAMBISSOLOS ÁLICO	
Unidade: Ca38 - Cambissolo álico Ta e Tb A proeminente e moderado textura argilosa e média mais Podzólico Vermelho-Amarelo álico Ta e Tb A proeminente e moderado textura média/argilosa e argilosa/muito argilosa relevo ondulado e forte ondulado.	
Unidade: Ca39 - Cambissolo álico Ta e Tb A proeminente e moderado textura argilosa e média mais Podzólico Vermelho-Amarelo álico Ta e Tb A proeminente e moderado textura média/argilosa e argilosa/muito argilosa relevo forte ondulado e ondulado.	
Unidade: Ca96 - Cambissolo álico Ta e Tb A moderado e	

proeminente textura argilosa e média mais Podzólico Vermelho-Amarelo álico Ta e Tb A moderado e proeminente textura média/argilosa e argilosa/muito argilosa mais Solos Litólicos álicos A moderado e proeminente textura média relevo montanhoso.

Solo: CAMBISSOLOS DISTRÓFICO E ÁLICO E DISTRÓFICO E EUTRÓFICO

Unidade: Cd2 - Cambissolo distrófico e álico Tb A moderado textura argilosa e siltosa relevo plano e suave ondulado.

Unidade: Cd5 - Cambissolo distrófico e eutrófico Tb A moderado e proeminente textura argilosa e muito argilosa mais Podzólico Vermelho-Amarelo álico e distrófico Tb A moderado textura média/argilosa relevo forte ondulado e ondulado.

Unidade: Cd9 - Cambissolo distrófico e eutrófico Tb A moderado e proeminente textura argilosa e muito argilosa mais Podzólico Vermelho-Amarelo álico e distrófico Tb A moderado textura média/argilosa mais Solos Litólicos eutróficos e distróficos A moderado textura média relevo montanhoso e forte ondulado.

Fonte: IBGE (2003)

Os Podzólicos Vermelho-Amarelo Latossólico Álico (PVL_a), pela classificação em primeiro nível categórico da EMBRAPA (1999) e referindo-se a nova classificação brasileira dos solos são denominados ARGISSOLOS. Os Cambissolos Álico, Distrófico e Eutrófico são denominados CAMBISSOLOS. Sendo assim, nota-se que 26% da bacia é formada pelos ARGISSOLOS e 74% pelos CAMBISSOLOS, ressaltando que a classificação Cambissolo Distrófico e Eutrófico é a de maior predominância (61%).

Com base no levantamento pedológico do IBGE (2003), foram selecionadas algumas características das unidades mapeadas, relevantes na interpretação do comportamento geotécnico dos solos (Tabela 3). Neste levantamento a cor do solo foi classificada de acordo com a tabela de Munsell (1971) e refere-se ao horizonte B, assim como as demais características apresentadas.

Tabela 3 – Descrição pedológica voltada ao mapeamento geotécnico

Classe	Unidade	Relevo	Textura	Atividade da argila	Uso do solo	Hidromórfico	Cerosidade	Cor
PVL ¹	PVL4	Forte ondulado	Argilosa e muito argilosa	Tb ⁴	Solos utilizados principalmente no cultivo de milho, banana e pastagem	Não hidromórfico	Pouca ou nenhuma	Bruno forte ou Vermelho-amarelada (7,5 YR) ⁵
	PVL5	Forte ondulado e ondulado						
C ²	Ca38	Ondulado e forte ondulado	Argilosa e média	Ta ³ e Tb ⁴	Solos utilizados principalmente com pastagens e reflorestamento	Não hidromórfico	Pouca ou nenhuma	Pode variar de bruno ou bruno-amarelada até vermelho escuro ⁵
	Ca39	Forte ondulado e ondulado						
	Ca96	Montanhoso						
	Cd2	Plano e suave ondulado	Argilosa e siltosa	Tb ⁴	Solos utilizados principalmente no cultivo de banana			
	Cd5	Forte ondulado e ondulado						
	Cd9	Montanhoso e forte ondulado	Argilosa e muito argilosa	Tb ⁴				

Nota: (1) Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico, (2) Cambissolo, (3) Atividade de argila alta e (4)- Atividade de argila baixa.

Fonte: (1). (2). (3). (4) - IBGE (2003) e (5) - EMBRAPA (1999)

As classes de textura e de relevo que caracterizam as unidades pedológicas foram determinadas segundo a metodologia do Centro Nacional de Pesquisa de Solos da EMBRAPA e são expostas nos Anexos II e III, respectivamente.

3.1.5 Geologia

A classificação geológica da bacia é representada na Figura 12 e identifica a predominância do Complexo Luís Alves (Ala), equivalente ao Complexo Granulítico de Santa Catarina, segundo Hartmann, Silva e Orlandi Filho (1979 *apud* IBGE, 2003), pertencente ao domínio Pré-Cambiano. Os demais domínios são formados pela Bacia do Paraná, representado pela Formação Mafra (CPm) nas porções oeste e norte da bacia, e pela Cobertura Sedimentar Quarternária composta por Sedimentos Aluvionares (QHa) localizados na região inferior da bacia até o seu exutório.

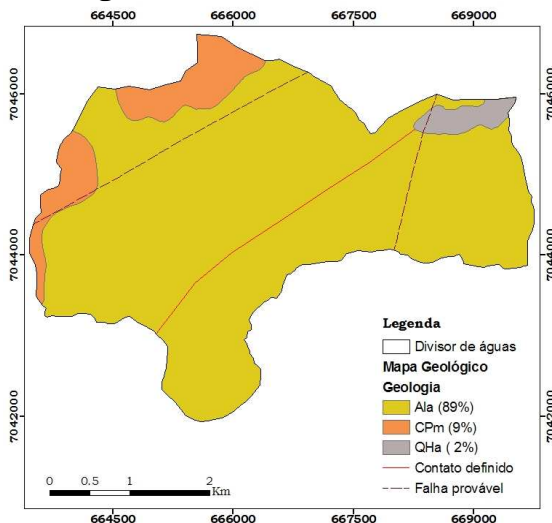


Figura 12 – Mapa geológico da bacia do Rio Cunha

Na Formação Mafra (CPm), segundo IBGE (2003), destacam-se os arenitos com granulometria fina, podendo variar de média a grossa e secundariamente encontram-se presentes os diamictitos, conglomerados formados em ambiente marinho e continental, ritmitos, argilitos e

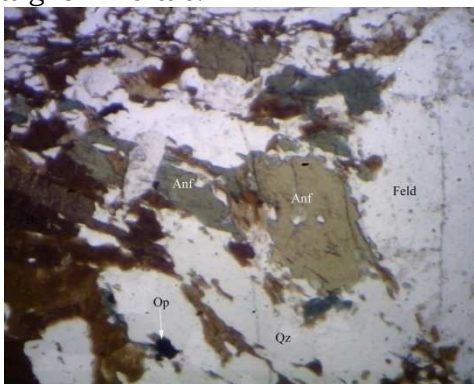
argilitos várlicos. Os Sedimentos Aluvionares (QHa) são formados por sedimentos quaternários (areias, cascalheiras e sedimentos silticos-argilosos inconsolidados, depositados em planície de inundação, terraços e calhas da rede fluvial). No Complexo Luiz Alves (Ala), a constituição litológica predominante é o gnaiss granulítico, porém apresenta ainda rochas metamórficas do fácies anfibolito e raramente do fácies xisto verde. Além do gnaiss granulítico ocorrem nesse complexo: quartzitos, formações ferríferas, paragnaisses, pequenos corpos de rochas ultrabásicas e rochas migmatíticas (IBGE, 2003).

Os gnaisses granulíticos são tipos particulares de gnaisses, da fácies metamórfica granulito, portadores do mineral hiperstênio. Apresentam a estrutura foliada ou bandada e normalmente coloração cinza esverdeada. Formam-se por uma alternância de minerais fêlsicos (sobretudo o feldspato) e máficos (anfibólios, piroxênios e biotita). Em locais específicos foram retrometamorfisados ao fácies anfibolito, identificados especialmente pela transformação do mineral hiperstênio em hornblenda. Por sua vez, os quartzitos são encontrados na forma de camadas ou lentes e apresentam granulação fina. Podem graduar para formações ferríferas onde o ferro encontra-se basicamente sob a forma de magnetita e hematita. Os paragnaisses ocorrem raramente, podendo ser calciossilicáticos ou kinzigíticos. As rochas ultrabásicas abrangem piroxenitos, harzburgitos, lherzolitos, dunitos e anfibolitos. As rochas migmatíticas são escassas e apresentam estrutura bandada com alternância de quartzo-feldspático e biotita mais anfibólio, predominando a biotita (IBGE, 2003).

O Complexo Luís Alves (Ala) representa 89% da área em estudo, sendo assim, uma amostra de rocha desta formação foi coletada em um dos movimentos de massa e submetida à análise petrográfica no Laboratório de Microscopia Ótica da UFSC. Nesta amostra foi identificado bandamento gnáissico formado pela alternância de bandas ricas em biotita orientada e bandas granulares constituídas por quartzo e feldspato (Figura 13). A

classificação petrográfica identificou a rocha como biotita gnaiss, da fácies anfibolito, por apresentar o mineral anfibólio e não ter hiperstênio. Assim, foi constatada a presença desta fácies na área em estudo.

Foi definido ainda que o solo de alteração desta rocha apresenta tendência granulométrica areno argilosa, onde o quartzo pode desenvolver grãos de areia e os minerais de feldspato, biotita e anfibólio podem formar os argilominerais.



Anf = Anfibólio
Bta = Biotita
Feld = Feldspato
Qz = Quartzo
Op = Minerais opacos

Figura 13 – Fotomicrografia de aspectos mineralógicos da rocha

Evidencia-se que um número maior de investigações petrográficas complementa as análises e a identificação da litologia predominante na unidade Ala.

3.1.6 Geomorfologia e Zoneamento

Quanto à geomorfologia, grande parte da área em estudo pertence à unidade geomorfológica Serras Cristalinas Litorâneas (M), caracterizada por relevo montanhoso e escarpado, bem como por elevados índices pluviométricos. Esta unidade apresenta normalmente, baixo índice demográfico e economia reduzida, favorecendo a conservação dos recursos naturais. Na bacia há também uma porção denominada Patamares e Platôs do Alto Rio Itajaí (E) e outra Planícies Aluviais (B). As referidas unidades (M, E e B) podem ser observadas na Figura 14 e correspondem respectivamente ao domínio morfoestrutural

Embasamentos em Estilos Complexos, Bacia Sedimentar do Paraná e Depósitos Sedimentares Quaternários.

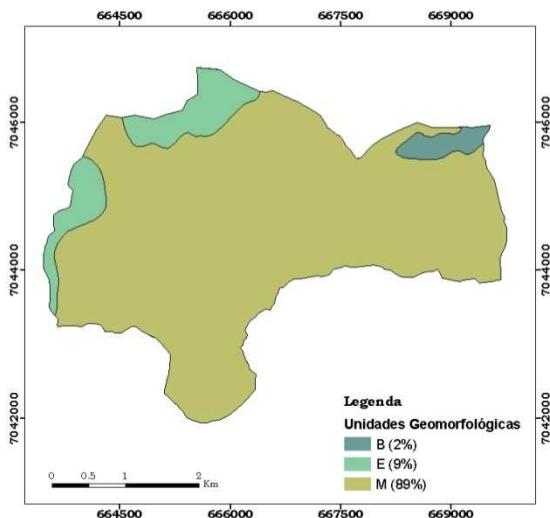


Figura 14 – Unidades geomorfológicas da bacia do Rio Cunha

A bacia apresenta dois tipos de modelados, classificados em Modelado de Dissecção (D) e Modelado de Acumulação (A). O D é formado por processos erosivos de origem fluvial e ou pluvial. De acordo com a forma de relevo dominante foi dividido em Modelado de Dissecção Morraria (Do) e Modelado de Dissecção Montanhas (Dm). O modelado A, identificado por ambientes de deposição, foi classificado como Modelado de Acumulação Terraço Aluvial (Atf). A Figura 15 ilustra os tipos de modelados presentes, Do, Dm e Atf, os quais representam respectivamente 34%, 64% e 2% da área em estudo.

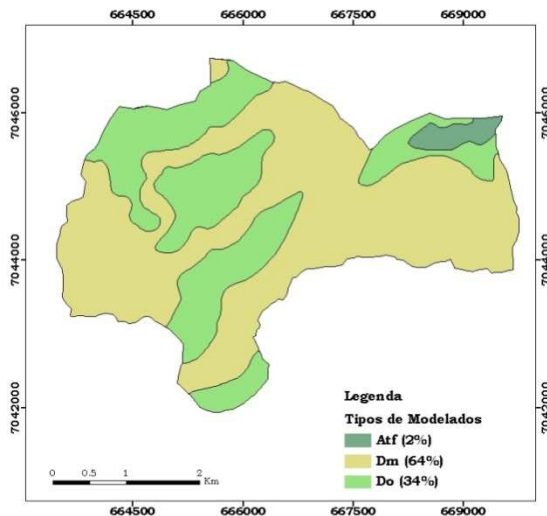


Figura 15 – Tipos de Modelados da bacia do Rio Cunha

A unidade Do é caracterizada por vales encaixados, encostas com declividade variando entre 20% e 45% e constituem elevações convexo-côncavas conformando morros. A unidade Dm apresenta vales bem encaixados, fechados, podendo conter terraços alveolares, topos extensos convexo-côncavos e encostas com diferentes graus de inclinação (variando entre 45% e 75%), por vezes desdobradas em patamares. O Modelado Atf representa áreas planas levemente inclinadas, apresentando rupturas de declive em relação ao leito do rio e às várzeas.

A identificação das características topográficas do relevo foi também realizada a partir do MDE e do mapa de declividade. O MDE compõe um mapa com informações de altimetria da bacia sendo de fundamental relevância ao mapeamento geotécnico e em análises de áreas suscetíveis a movimentos de massa (Figura 16). O mapa de declividade ilustra a variabilidade espacial do parâmetro topográfico declividade, também relacionado aos processos que regem a instabilidade e a ocupação das encostas. Este mapa foi representado segundo as classes de relevo definidas pela EMBRAPA (1999) e pode ser observado na Figura 17, juntamente com o percentual destinado a cada classe.

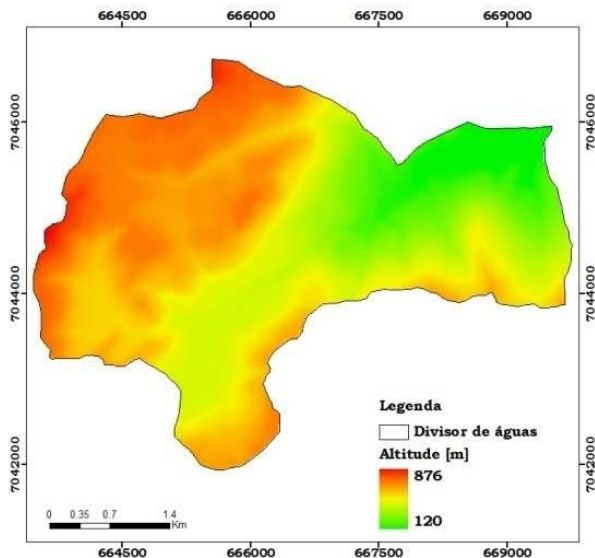


Figura 16 – MDE da bacia do Rio Cunha

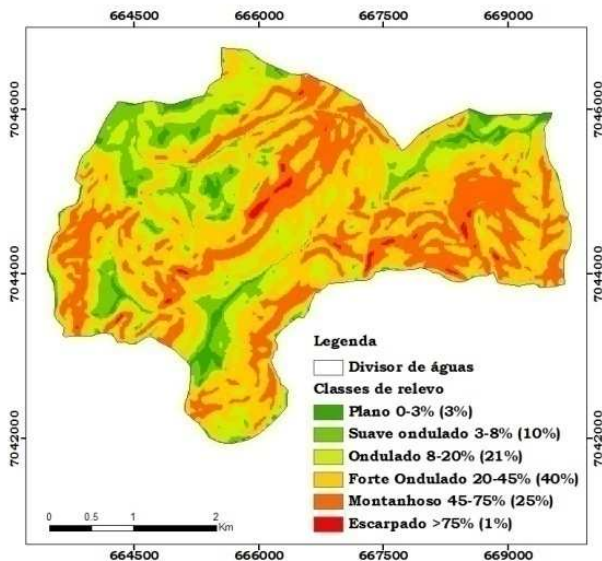


Figura 17 – Classes de relevo segundo EMBRAPA (1999)

Com base no MDE, nota-se que a altitude da área compreende a variação entre 120m e 879m acima do nível do mar (amplitude altimétrica de 759m), sendo que as áreas de baixa altitude (de até 200m), localizam-se próximas ao exutório da bacia e, aquelas superiores a 600m (representando 40% da área), predominantemente a noroeste.

Em relação ao mapa de declividade, 40% da área possui relevo forte e ondulado e 25% montanhoso, caracterizando o relevo de uma paisagem predominantemente formada por morros e montanhas com superfície topográfica movimentada e muito movimentada. As classes de relevo forte ondulado e montanhoso, correspondentes a mais da metade da área total, conferem ao terreno a presença de encostas com declividades acentuadas que favorecem a ocorrência de movimentos de massa.

A Figura 18 ilustra a paisagem de um local na bacia, onde identifica-se uma área montanhosa caracterizada pela cicatriz de um movimento de massa. São também identificados blocos de rochas na superfície do terreno, possivelmente oriundos de antigas movimentações.



Figura 18 – Paisagem da bacia suscetível a movimentos de massa

Considerando a vulnerabilidade da área é imprescindível apurar e respeitar as restrições legais quanto ao uso e a ocupação do solo, aumentando desta forma, a segurança da população. Assim, o Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável de Rio dos Cedros,

instituído a partir da lei complementar N°. 109 de 21 denovembro de 2006, orienta a utilização do território a partir de um planejamento territorial, que distingue as áreas em macrozonas e zonas, de acordo com uso permitido.

A Macrozona denominada Ocupação Rarefeita (MZ 2) constitui 56% da bacia em estudo, individualizando um local com fragilidade ambiental, pouca área urbana e infra-estrutura, caracterizando uma área rural. Essa macrozona subdivide-se em duas zonas sob as seguintes denominações: Zona de Ocupação Controlada (ZOC) e Zona de Ocupação Rarefeita (ZOR). Por sua vez, a Macrozona de Interesse Ambiental e Turístico (MZ 1) representa 44% da área e é classificada em Zona de Preservação Permanente (ZPP). O mapa de zoneamento em escala 1:50.000, ilustra as referidas classes e os percentuais de ocupação correspondentes (Figura 19) e a Tabela 4 apresenta a descrição de cada uma.

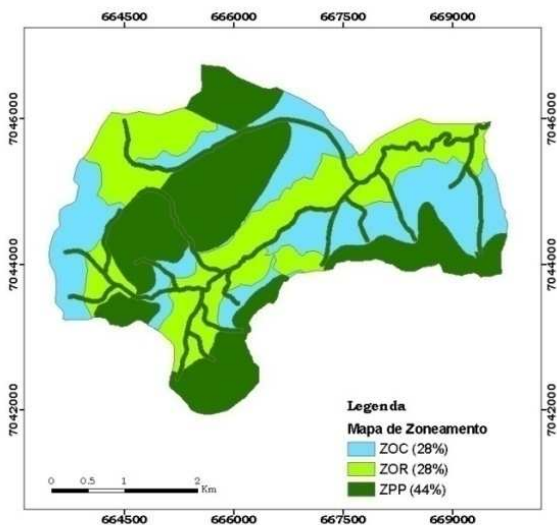


Figura 19 – Mapa de zoneamento segundo o Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável de Rio dos Cedros de 2006

Tabela 4 – Descrição das Zonas da bacia do Rio Cunha

Macrozona	Zona	Descrição
MZ - 2	ZOC	Áreas com condições físico territoriais que restringem a ocupação, por possuírem declividade superior a 30% e inferior a 100%, portanto de ocupação controlada visando evitar a degradação ambiental e da paisagem e também potencializá-las para o turismo.
	ZOR	Áreas com ocupação rarefeita, situadas fora do perímetro urbano e com declividade inferior a 30% para uso da produção primária, condições favoráveis a ocupação.
MZ - 1	ZPP	Áreas não urbanizáveis por possuírem declividade superior a 100%, serem o terço superior dos morros ou faixas de proteção ao longo dos cursos d'água e nascentes.

Fonte: Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável de Rio dos Cedros (2006)

Nota-se a predominância de áreas de preservação permanente, ou ZPP, identificadas segundo a Legislação Federal, destacando-se o Código Florestal (Lei Federal N° 4.771 de 15/09/1965) e alterações. Dos 44% de ZPP, 9% corresponde aos cursos d'água e os outros 35% aos topos de morros. A Tabela 5 expõe alguns dos critérios de ocupação e os usos proibidos das ZPP, bem como das demais zonas presentes na bacia.

Tabela 5 – Índices urbanísticos

Critérios de ocupação do solo	Zonas		
	ZOC	ZOR	ZPP
Área mínima [m ²]	20.000	20.000	-
Testada mínima [m]	20	20	-
Taxa de ocupação máxima	10%	20%	-
Coefficiente de aproveitamento	0,2	0,2	-
Número máximo de pavimentos	2	2	-
Recuo frontal mínimo [m]	10	10	-
Recuo lateral e de fundos mínimo [m]	3	3	-
Atividades Proibidas (Pp ¹ Mp ² Gp ³)			
Comércio e depósitos	MpGp	Gp	PpMpGp
Serviços	MpGp	Gp	PpMpGp
Institucionais	PpMpGp	-	PpMpGp
Indústria de baixo potencial de degradação ambiental	MpGp	Gp	PpMpGp
Indústria de médio potencial de degradação ambiental	PpMpGp	Gp	PpMpGp
Indústria de alto potencial de degradação ambiental	PpMpGp	PpMpGp	PpMpGp

Pp¹: pequeno porte, Mp²: médio, Gp³: grande

Fonte: Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável de Rio dos Cedros (2006)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades realizadas nesse estudo seguem apresentadas na Figura 20.

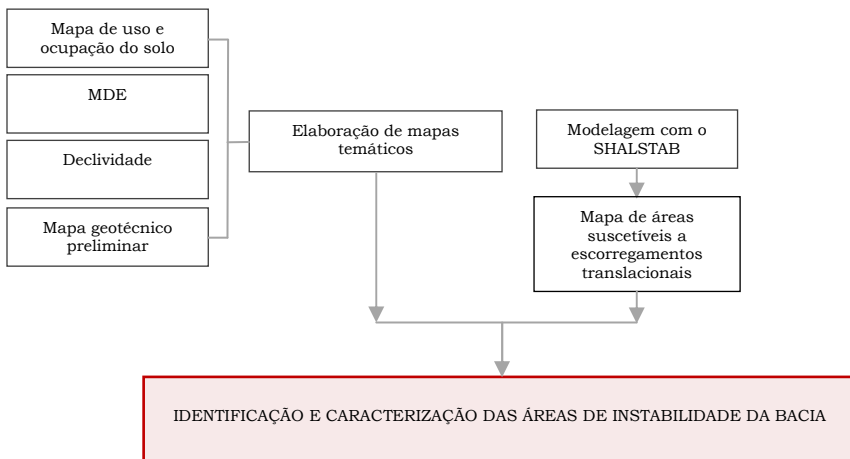


Figura 20 – Estruturação da pesquisa

4.1 Materiais

4.1.1 Dados cartográficos

Para o presente estudo foram utilizados os seguintes dados cartográficos:

- Mapa pedológico e geológico em escala 1:100.000, referentes a folha SG.22-Z-B-IV, disponibilizados no formato digital pelo IBGE (2003), com projeção *Universal Transversa de Mercator* (UTM), *Datum* Horizontal SAD-69 e Vertical de Imbituba/SC. Além dos mapas foram consultados os relatórios técnicos dos levantamentos geológicos e de solos do IBGE (2003);
- Dados vetoriais no formato digital, referentes aos cursos d'água, vias interurbanas, unidades habitacionais e curvas de nível, na escala 1:50.000, cedidos pela EPAGRI/CIRAM;

- Imagens do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), de 14 de abril de 2006, com resolução espacial de 15m (bandas do visível e infravermelho próximo) e de 30m (infravermelho de ondas curtas);
- Curvas de nível e ortofotos na escala 1:5.000, obtidas pelo método de perfilamento digital Leica ADS40, em novembro de 2008, e cedidas pelo Laboratório de Hidrologia (Labhidro) da UFSC. As ortofotos foram disponibilizadas em três bandas distintas, na composição RGB-123, com até 3% de cobertura de nuvens. O erro quadrático médio altimétrico e planimétrico do levantamento é de 2m e 1,5m respectivamente;
- Relatórios técnicos dos movimentos de massa ocorridos no município de Rio dos Cedros, elaborados pelo CEPED em 2009 e 2010, sendo que, os registros de 2009 correspondem ao Projeto de Resposta ao Desastre em Santa Catarina no Ano de 2008.

4.1.2 Programas computacionais

Para a elaboração dos mapas, edição dos dados de entrada e simulações dos movimentos de massa, foram utilizados os programas computacionais:

- ArcGis versão 9.2, desenvolvido em 2006 pela *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), Redlands, Califórnia, EUA;
- ArcView versão 3.2a com a extensão SHALSTAB;
- *Idrisi Andes* versão 15.0 de Eastman (2006);
- ENVI (*Environment for Visualizing Images*) versão 4.2.

4.2 Métodos

4.2.1 Mapeamento de aspectos topográficos

Os mapas topográficos (MDE e de declividade), nesse estudo, além da caracterização do relevo da bacia, serviram de base para a modelagem com o SHALSTAB e auxiliaram na identificação e caracterização de unidades de

mapeamento geotécnico e áreas de instabilidade. Os procedimentos para a construção dos mesmos são elucidados a seguir.

Na determinação do MDE foram utilizadas as curvas de nível (equidistância de 20m) e a rede de drenagem (corrigida), obtidas das cartas planimétricas digitais. Para a elaboração do MDE utilizou-se o método de interpolação que emprega o algoritmo ANUDEM, disponível na ferramenta *topo to raster* do ArcGis 9.2. Na interpolação dos dados foi utilizada uma resolução espacial de 15m. Esta resolução é compatível com a acurácia da escala dos dados de entrada e com o tamanho do pixel da imagem do sensor ASTER, utilizada na elaboração do mapa de uso e ocupação do solo.

Para melhorar a precisão do MDE foram removidas as depressões geradas erroneamente na interpolação dos dados, denominadas *sinks* (sumidouros), com o auxílio da ferramenta *Remove Sinks* do modelo SHALSTAB. Além disso, para representar a forma real da direção do fluxo d'água em cada canal de drenagem da bacia, os vetores referentes aos cursos d'água foram orientados para jusante, utilizando ferramenta *Flip* do ArcGis 9.2 (Figura 21).

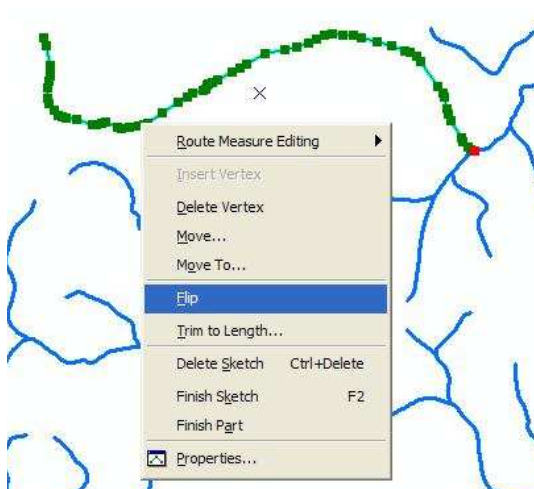


Figura 21 – Retificação da drenagem para jusante (direção representada pelo retângulo vermelho)

Com base no MDE determinou-se: o mapa de declividade (utilizando um algoritmo de cálculo disponível no ArcGis 9.2) e a área de contribuição (elaborada a partir do modelo SHALSTAB).

Visando a identificação e caracterização das unidades de mapeamento, bem como a verificação das áreas instáveis, utilizou-se intervalos de 50m para representar o MDE.

Na classificação do relevo das unidades de mapeamento foram definidos intervalos de declive conforme preconiza EMBRAPA (1999) (Anexo III). Por sua vez, na verificação das faixas de declividade das áreas instáveis foram definidos intervalos de declive variando de 5°.

Observa-se que o MDE e o mapa de declividade foram elaborados para uma área de abrangência maior que os limites da bacia, aumentando desta forma, o número de dados interpolados e a confiabilidade dos mapas. Entretanto, para as entradas no modelo SHALSTAB e caracterização foram utilizados somente os dados de relevo da área de abrangência da bacia do Rio Cunha.

4.2.2 Mapa de uso e ocupação do solo

Para a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo foram utilizadas imagens de satélite do sensor ASTER, referentes ao mês de abril de 2006, a fim de caracterizar a cobertura do solo antes do episódio de novembro de 2008 e também porque nessa data havia baixa cobertura de nuvens na região.

O processamento da imagem ASTER realizado no programa *Idrisi Andes15.0*, consistiu nas etapas de georreferenciamento, realce utilizando a combinação RGB-234, recorte da área de interesse e classificação. Para o emprego do RGB 234, que ressalta e distingue as áreas de solo exposto, vegetação e corpos hídricos, fez-se necessário a reamostragem da banda 4 para a resolução espacial de 15m no ENVI 4.2.

As imagens ASTER foram georreferenciadas, utilizando o sistema de coordenadas de referência

Universal Transversa de Mercator (UTM), no fuso 22S, *Data* horizontal SAD-69 e vertical de Imbituba/SC. Para tanto utilizou-se o método polinomial (primeiro grau), para ajuste dos pontos e o método do vizinho mais próximo para a reamostragem dos *pixels* da imagem bruta. O erro quadrático médio foi de 0,834 *pixel*, menor do que a resolução de 15m.

A etapa seguinte consistiu na classificação da imagem, objetivando a caracterização do uso e cobertura do solo. Para este estudo foram utilizadas seis classes de uso e ocupação do solo: mata nativa, pastagem, reflorestamento, agricultura, solo exposto (ausência de cobertura e estradas não pavimentadas) e corpos d'água (cursos de água, lagos e lagoas), identificadas em inspeções a campo realizadas no ano de 2010. O método utilizado na classificação foi o de máxima verossimilhança. Esse método descreve os valores dos *pixels* de uma amostra de treinamento por uma função de densidade de probabilidade. Assim, o classificador (algoritmo) examina a probabilidade de um *pixel* pertencer a uma determinada classe e o classifica na que apresentar maior probabilidade (CROSTA, 1999). Para tanto, foram obtidas amostras de treinamento sobre a imagem, representativas de cada classe de uso e ocupação do solo.

Visando auxiliar na identificação das amostras de treinamento foram levantados em campo 50 pontos com um receptor GPS de navegação, representativos dos diferentes usos e cobertura do solo, conforme Tabela 6. Além disso, foram sobrepostas as estradas e os cursos d'água obtidos das cartas topográficas.

Salienta-se que as estradas presentes na bacia não são pavimentadas, desta forma foram classificadas como solo exposto.

Após a classificação automática, visando melhorar a precisão do mapa de uso e ocupação do solo, este foi comparado com os dados coletados em campo nos diferentes usos do solo.

Tabela 6 – Pontos de controle em cada classe de uso e ocupação do solo da bacia do Rio Cunha

Classes de uso e ocupação do solo	Número de amostras
Agricultura	7
Corpos d'água	2
Mata nativa	11
Pastagem	13
Reflorestamento	12
Solo exposto (ausência de cobertura)	5

4.2.3 Mapeamento geotécnico

No mapeamento geotécnico objetivou-se identificar as unidades geotécnicas preliminares, com ênfase na individualização da unidade mais suscetível a movimentos de massas. Esse foi elaborado com base na interpretação de mapas, dados de campo e de laboratório, conforme apresentado na Figura 22.

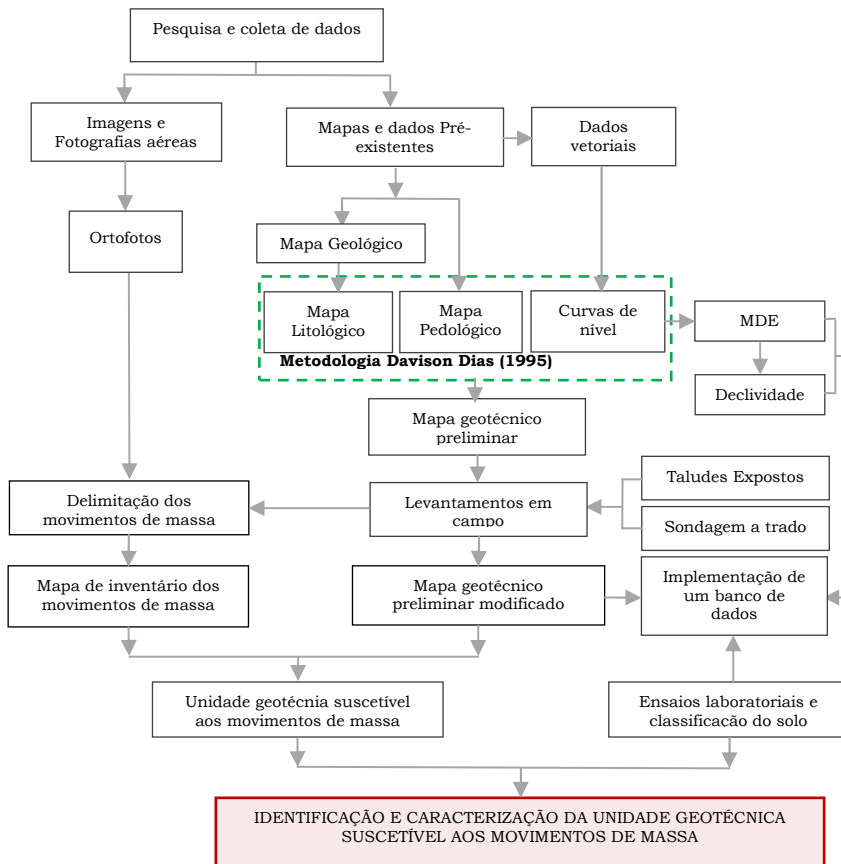


Figura 22 – Fluxograma de atividades do mapeamento geotécnico

4.2.3.1 Mapa geotécnico preliminar

Na bacia do Rio Cunha, visto que um dos maiores problemas está relacionado à instabilidade das encostas, o mapa geotécnico preliminar visou à caracterização do meio físico e dos locais atingidos pelos movimentos de massa. Também permitiu a divisão dos solos da bacia em dois grandes grupos geotécnicos (solos sedimentares e residuais), possibilitando o direcionamento das análises ao grupo de maior interesse frente à problemática. Adicionalmente resultou na elaboração de um mapa base, a partir do qual poderão ser elaborados mapas temáticos

com finalidades específicas e relevantes ao planejamento do uso e ocupação do solo.

Na elaboração do mapa geotécnico preliminar, ou seja, de um mapa com estimativas de unidades geotécnicas, foi empregada a metodologia de mapeamento proposta por Davison Dias (1995) e modificada por Higashi (2006), com o auxílio do programa ArcGis 9.2.

Seguindo os preceitos dessa metodologia, as unidades geotécnicas preliminares presentes na área de estudos resultaram da sobreposição do mapa pedológico e litológico, bem como das curvas de nível (Figura 23). O mapa litológico foi elaborado com base na interpretação do mapa geológico, do qual foi retirada a rocha predominante de cada domínio. Ressalta-se que o MDE e o mapa de declividade foram utilizados para fazer a distinção das áreas de solos residuais e sedimentares.

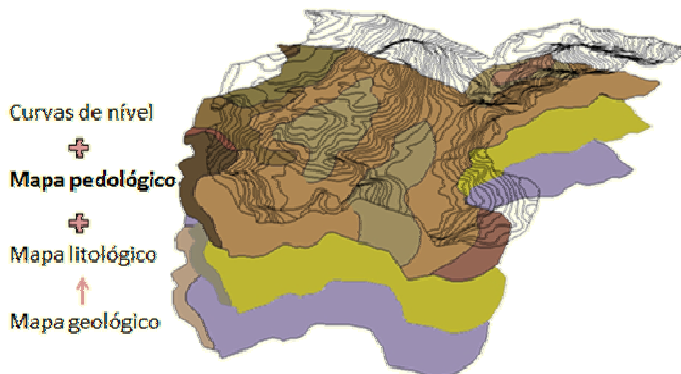


Figura 23 – Sobreposição dos mapas pela Metodologia Davison Dias (1995)

Os dados de entrada utilizados no mapeamento compreenderam inicialmente o mapa pedológico e geológico em escala 1:100.000 do IBGE (2003). Sobre esses mapas realizaram-se os seguintes procedimentos: i) classificação dos polígonos com o seu respectivo atributo, pedológico ou geológico, com base nos mapas originais; ii) definição da rocha predominante em cada unidade geológica, com base do relatório técnico geológico do IBGE (2003) e iii) elaboração do mapa litológico.

No ArcGis foi realizada uma combinação entre o mapa geológico e pedológico, resultando em polígonos com atributos pedológicos e litológicos, que representam áreas de solos com comportamento geomecânico semelhante com base na sua gênese.

Esses polígonos foram classificados de forma a sugerir o perfil típico do local, ou seja, segundo a pedologia dos horizontes A e B (representada por siglas em letras maiúsculas) e pela geologia dos horizontes C, RA e R, por letras minúsculas (Figura 24). Na existência de diversas litologias predominantes no substrato, a unidade é identificada através de suas siglas em letras minúsculas separadas por vírgula.

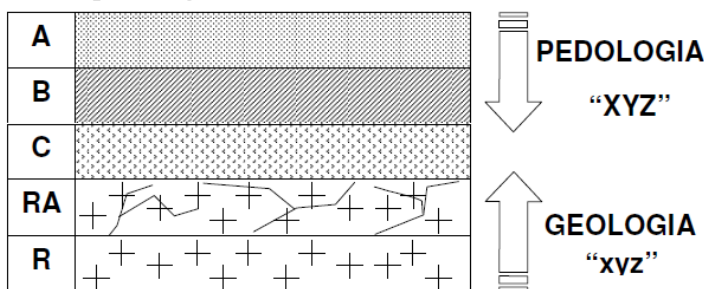


Figura 24 – Classificação dos polígonos (metodologia de Davison Dias)

Fonte: Higashi (2006)

Os símbolos utilizados nas classificações pedológicas e geológicas definidas por Davison Dias (2001), encontram-se na Tabela 7 e Tabela 8. Para as classes de solos que não tiveram correlação com as classificações dessas tabelas foram adotadas as simbologias segundo IBGE (2003), como é o caso do Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico (PVL). Em relação ao gnaiss granulítico predominante no Complexo Luís Alves (Ala), adotou-se a sigla gn (gnaiss) em correspondência com a Tabela 8, representando, no entanto, um substrato composto por quartzo e feldspato, minerais essenciais do gnaiss, mais piroxênio (típico da fácies granulito) hornblenda e outros minerais máficos (de ferro e magnésio), de acordo com a análise petrográfica descrita no item 3.1.5.

Tabela 7 – Simbologia simplificada das classes pedológicas

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
A	Aluviais	P	Podzóis Indiscriminados
AQ	Areia Quartzosa	PB	Podzólico Bruno-Acidentado
B	Brunizém	PE	Podzólico Vermelho-Escuro
BV	Brunizém Vértico	PL	Planossolo
C	Cambissolo	PLV	Planossolo Vértico
CB	Cambissolo Bruno	PLP	Planossolo Plíntico
GH	Glei	PT	Plintossolo
HO	Solo Orgânico	PV	Podzólico Vermelho-Amarelo
LA	Latossolo Amarelo	R	Litólico
LB	Latossolo Bruno	TR	Terra Roxa Estruturada
LBC	Latossolo Bruno Câmbico	TB	Terra Bruna-Estruturada
LBR	Latossolo Bruno-Roxo	TBR	Terra Bruna-Roxa
LE	Latossolo Vermelho-Escuro	TBV	Terra Bruna Podzólica
LR	Latossolo Roxo	V	Vertissolo
LV	Latossolo Vermelho-Amarelo		

Fonte: Davison Dias (2001)

Tabela 8 – Geologia e Litologia simplificada

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
a	Arenito	g	Granito
ag	Argilito	gl	Granulito
an	Andesito	gn	Gnaisse
ar	Ardósia	gd	Granitóide
b	Basalto	ma	Mármore
br	Brecha	p	Pelito
c	Conglomerado	q	Quartzito
ca	Calcáreo	r	Riolito
cm ¹	Complexo metamórfico (¹)	si	Sienito
cr	Carvão	s	Siltito
d	Diorito	sq	Sedimentos quaternários
da	Dacito	st	Sedimentos terciários
f	Folhelho	x	Xisto

Nota: (¹) Complexo formado por várias rochas metamórficas de difícil individualização.

Fonte: Davison Dias (2001)

Na etapa de classificação, além da nomenclatura foram identificadas e corrigidas as inconsistências encontradas no mapeamento quanto à formação das unidades, ou seja, relacionadas a divergências entre a geologia e a pedologia. Estas inconsistências são atribuídas

à incompatibilidade entre os dados cartográficos originais e foram retificadas com base no mapa geológico, atribuindo ao polígono um tipo de solo compatível com o substrato presente.

Em seguida, a cada polígono associou-se um banco de dados (BD). Para compor o BD foram selecionados os seguintes dados: i) solos (granulometria, atividade de argila, hidromorfismo, cerosidade e cor); ii) relevo; iii) uso e ocupação do solo e iv) geológicos (rocha predominante). Os parâmetros do horizonte A, que o distingue em distróficos, eutróficos e álicos não foram incluídos, bem como as associações de solos.

Com base no BD foram identificadas e agrupadas as unidades com características similares, gerando um mapa de fácil interpretação e relevância geotécnica. No agrupamento, de forma geral, os polígonos formados pela mesma classe de solo (PVL, C) e litologia foram classificados de forma idêntica.

Distinguiu-se ainda, baseando-se preliminarmente na formação geológica do substrato de cada unidade, os solos de origem residual e sedimentar, separando as unidades em dois grandes grupos com técnicas de investigações e comportamento geotécnico específico. Nesse mapeamento a faixa de transição entre estes grupos corresponde à separação dos solos desenvolvidos de gnaisses e arenito (solos residuais), daqueles originários de sedimentos quaternários (solos sedimentares). Também definiu-se que os solos presentes em depósitos de encosta, normalmente classificados como de origem sedimentar, em virtude do seu comportamento fossem agrupados àqueles de origem residual, possibilitando o emprego das mesmas técnicas de caracterização geotécnica.

Na sequência, considerando que as variações do relevo (altitude ou declividade) são indicadoras de unidades geotécnicas e, observando que o mapa geotécnico preliminar apresenta escala 1:100.000, foi realizado o ajuste dos polígonos com as curvas de nível na escala 1:50.000 (Figura 25), conforme Davison Dias (1987). Este procedimento visa representar a influência da variação das

altitudes na formação dos solos e ainda ampliar a escala do mapeamento, tornando-o compatível com o mapa de instabilidade e uso e ocupação do solo, ambos na escala 1:50.000.

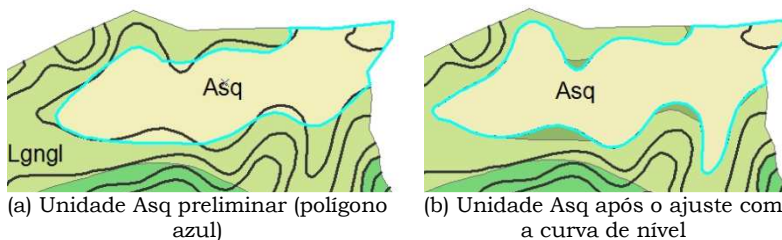


Figura 25 – Exemplo de ajuste da unidade com a curva de nível na área em estudo

No entanto, para ampliar a escala do mapa foi necessário limitar as unidades pré-definidas, por meio de levantamentos a campo. Cabe ressaltar que devido à falta de estradas e a presença de escombros nos taludes expostos, o acesso a determinados locais foi dificultado, inviabilizando o detalhamento de todas as unidades geotécnicas preliminares. Desta forma, as análises se restringiram para a separação das unidades de origem sedimentar e residual.

4.2.3.2 Mapa geotécnico preliminar modificado

Tomando-se como base o mapa geotécnico preliminar e os topográficos (MDE e declividade) foram feitas aferições no campo (tradagens superficiais e análises de taludes expostos) com a finalidade de constatar o limiar entre os solos de origem sedimentar e residual, gerando o mapa geotécnico preliminar modificado.

Os locais aferidos correspondem as áreas limítrofes à faixa de transição entre os solos sedimentares e residuais (previamente definidos), bem como as áreas de elevação baixa e relevo plano (típicas de solos sedimentares) circundadas por regiões de relevo mais elevado (características de solos residuais).

Para a identificação prévia destas áreas foram sobrepostos ao MDE os polígonos que representam os solos sedimentares e os residuais, por meio do ArcGis, e

elaborados perfis topográficos (Figura 26). Para verificar a acessibilidade dos locais foram sobrepostas as estradas, e, após visitas a campo, foi realizada a divisão da área em trechos inspecionáveis (11,2km) e não inspecionáveis, sendo um fator determinante na escolha das áreas a serem visitadas em campo. O MDE, nesta etapa, foi gerado a partir do método de interpolação de rede triangular irregular (TIN), por permitir uma melhor visualização das áreas de interesse. A Figura 26 ilustra as áreas de interesse definidas com base no MDE, no mapa geotécnico preliminar e nos perfis topográficos.

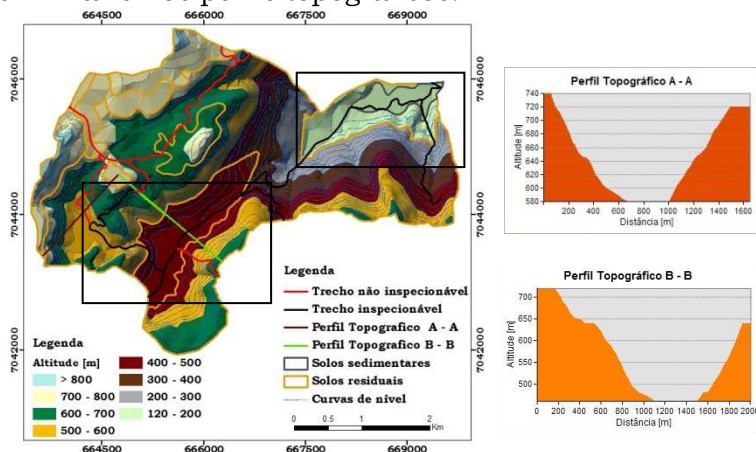


Figura 26 – Áreas de interesse (delimitadas por retângulos)

A partir das áreas de interesse foram definidos como pontos de investigações os locais onde ocorreram mudanças no relevo, de acordo com as classes de declividade descritas pela EMBRAPA (1999), distinguindo os solos formados em áreas de relevo plano, suave ondulado e assim sucessivamente, aumentando o nível de detalhamento do levantamento, conforme Higashi (2006).

Para auxiliar na localização destes pontos no campo foi utilizado o mapa de relevo (Figura 17) e um GPS de navegação, porém, na análise da paisagem local que os mesmos foram definidos.

No campo foram coletadas 45 amostras deformadas de solo a 1m de profundidade, com o auxílio de um trado

pedológico elicoidal de 1,20m (Figura 27), classificadas em relação a sua origem (residual ou sedimentar). As amostragens, de forma geral, iniciaram em locais de relevo plano e seguiram para os locais de maiores declividades até encontrar perfis de solos residuais, identificando a transição entre os grupos de solo.



Figura 27 – Coleta de amostras de solo com o trado

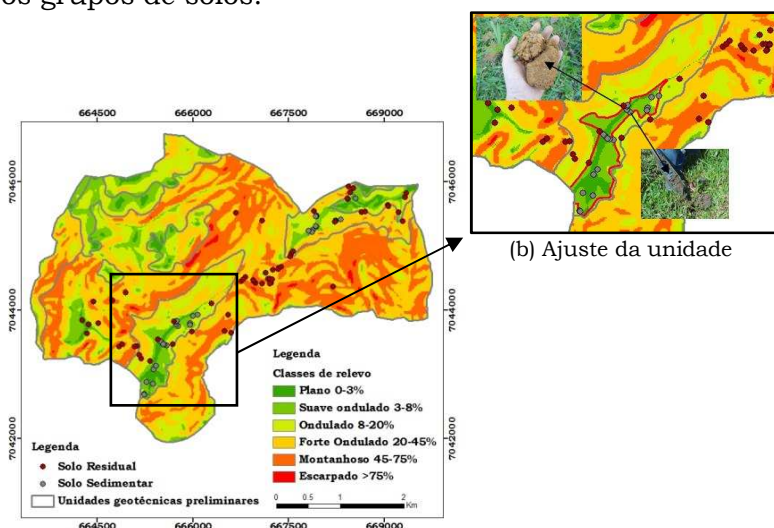
A classificação das amostras fundamentou-se nas análises de determinadas características físicas do solo (textura, consistência, cor e odor), associadas à peculiaridades do terreno observadas em campo (uso e ocupação do solo, proximidade de um curso d'água, e posição do lençol freático). Para tanto foram empregados os procedimentos expeditos descritos e ilustrados no Anexo IV. Dessa forma foi possível distinguir ainda perfis de solos hidromórficos e não hidromórficos e caracterizar aqueles de origem sedimentar. Não foi possível distinguir os perfis de solos residuais devido à profundidade de alcance do trado pedológico utilizado.

Além disso, visando identificar solos de origem residual, foram mapeados ao longo das estradas da bacia 46 taludes expostos (TE), ou seja, perfis de solos, sendo que, alguns apresentaram indícios de depósitos de encosta (DE), associados a antigos movimentos de massa.

Por fim, os pontos classificados como solos de origem sedimentar e residual foram distribuídos, por meio das

suas coordenadas no mapa de declividade, classificado conforme EMBRAPA (1999), e associados ao mapa geotécnico preliminar para o ajuste do limiar entre os grupos de solos (Figura 28).

No ajuste, a maioria dos pontos classificados como solos sedimentares encontraram-se em locais de relevo plano e suave ondulado. Assim, estas classes de relevo foram delimitadas e associadas às unidades geotécnicas preliminares que representam solos de origem sedimentar. Adicionalmente, os pontos classificados como solos de origem residual, auxiliaram na identificação do limiar entre os grupos de solos.



(a) Distribuição dos pontos investigados

Figura 28 – Unidades de solos sedimentares e residuais

4.2.3.3 Unidade geotécnica suscetível aos movimentos

Objetivando definir a unidade geotécnica de ocorrência dos movimentos de massa, os locais atingidos por estes fenômenos foram identificados e representados em um mapa denominado mapa de inventário dos movimentos de massa.

A identificação dos movimentos foi realizada com base em interpretações de ortofotos, na escala 1:5.000 e

obtidas em novembro de 2010, investigações em campo, realizadas em fevereiro de 2012 e consultas a levantamentos históricos (relatórios e trabalhos científicos) de movimentos de massa dessa região.

Os dados históricos abrangem as ocorrências dos anos de 2008 e 2010 e foram extraídos de CEPED (2009), CEPED (2010), Rocha (2011) e Kobiyama et al. (2010).

Devido a dimensão de determinados movimentos, foi possível identificar por meio das ortofotos os traços que delimitam as suas cicatrizes, proporcionando o cálculo da área, perímetro e extensão aproximada.

A delimitação e a representação dos movimentos no mapa foram realizadas por meio de polígonos (correspondentes às cicatrizes mapeadas) e pontos (representando os movimentos de menores magnitudes).

Os fenômenos reportados foram classificados em relação ao tipo do movimento (escorregamentos, fluxos e rastejos) e divididos em dois grandes grupos: naturais ou induzidos, dependendo da influência ou não de intervenções antrópicas.

Ressalta-se que nesse estudo as ocorrências de escorregamentos seguidos de fluxo, classificadas de acordo com o acervo histórico como movimentos complexos, foram identificadas somente como fluxos, sendo mencionado no BD o tipo de escorregamento que deu origem a este fenômeno, caracterizando a zona de ruptura.

No mapa de inventário também foram identificadas as ocorrências de DE, considerando que a deposição de materiais (solos e rochas), em regiões de encostas é um sinal de problemas relacionados à instabilidade. A identificação dos DE foi baseada em análises dos perfis de solos residuais expostos (TE), item 4.3.2, os quais foram divididos em taludes de origem residual ou de deposição.

Os taludes em solos de origem residual foram identificados por apresentarem perfis formados por processos de intemperismo, onde normalmente é possível identificar os horizontes que os constituem. A Figura 29 ilustra um exemplo de TE classificado como de origem

residual, onde o horizonte C apresenta características texturais da rocha de origem.



Figura 29 – Horizonte C de um solo de origem residual

A identificação de um DE depende de uma série de atributos (geológicos, geotécnicos e morfológicos) e de análises específicas. No entanto, a individualização dos mesmos foi realizada de forma simplificada e expedita, representando locais onde a sua ocorrência é provável.

Desse modo, foram considerados DE os taludes caracterizados da seguinte forma: i) com cobertura vegetal formada por um tipo de samambaia conhecida pelo nome vulgar de samambaia de campo (cobertura muitas vezes evidenciada em depósitos de encosta) (Figura 30); ii) localizado na base das encostas de relevo movimentado e/ou em locais onde a geomorfologia é similar a um cone e iii) com a presença de blocos de rochas sub-angulares em meio ao perfil de solo (estrutura caótica do perfil) e/ou na superfície (Figura 31).



Figura 30 – Vegetação muitas vezes evidenciada em depósitos de encosta (samambaia de campo)



Figura 31 – Estrutura caótica do perfil de solo

Os taludes classificados como DE identificam locais onde a possibilidade de ocorrência de um depósito é diretamente proporcional ao número de atributos observados em campo. Por este motivo, adotou-se o critério de representação no mapa conforme ilustrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Representação dos depósitos de encosta no mapa

Depósito de encosta	Número de atributos	Símbolo
DE1	1	●
DE2	2	●
DE3	3	●

Por fim, o mapa de inventário possibilitou a identificação do principal fenômeno na bacia, e, a partir da sua sobreposição com o mapa geotécnico preliminar refinado foi possível identificar a unidade geotécnica onde estão presentes os movimentos e os DE, considerada, nesse estudo, como aquela de maior suscetibilidade à ocorrência dos mesmos.

4.2.3.4 Elaboração do banco de dados (BD)

Os dados foram levantados dando ênfase à unidade mais suscetível aos movimentos de massa, caracterizando qualitativamente e quantitativamente fatores do meio físico que influenciaram na deflagração dos principais movimentos presentes nesta unidade. Esses dados foram armazenados no BD do ArcGis 9.2

A identificação das características topográficas foi realizada a partir MDE e do mapa de declividade, de onde foram extraídos dados de altimetria e de declividade dos movimentos. Quanto aos aspectos geológicos e pedológicos, o mapa geotécnico preliminar refinado possibilitou a individualização do substrato rochoso e do manto de alteração. No entanto, em virtude da escala foi realizada a análise petrográfica de amostras de rocha (item 3.1.5). Para a caracterização geotécnica do material envolvido nas rupturas foram realizados ensaios laboratoriais de amostras de solos.

Foram coletadas em campo dez amostras de solo no estado deformado e indeformado, em locais definidos como o início do movimento (zona de ruptura) e envolvendo o horizonte C. Os locais de coleta podem ser observados na Figura 32 e correspondem aos dois maiores movimentos mapeados (A e B). As amostras indeformadas foram extraídas por meio de moldes metálicos (facilitando o seu transporte) e armazenadas de forma a conservar o máximo a umidade natural do solo (Figura 33).

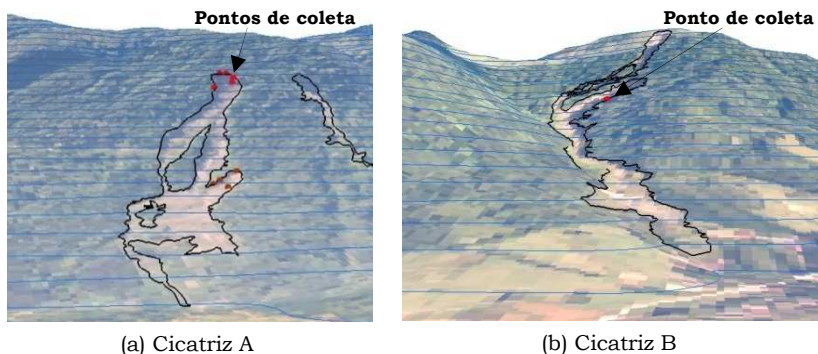


Figura 32 – Pontos de coleta das amostras

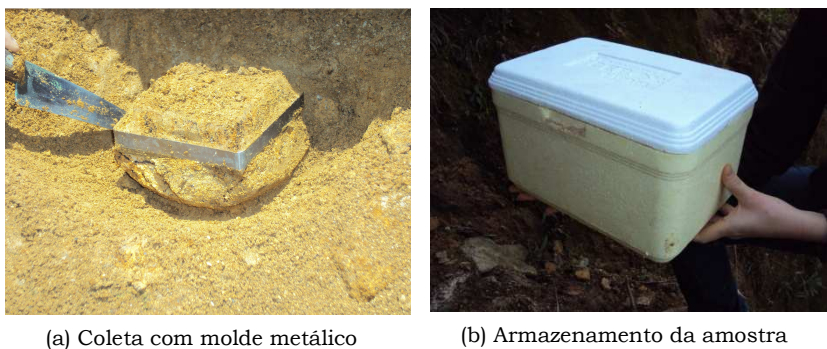


Figura 33 – Armazenamento das amostras de solo

As amostras de solos foram submetidas a ensaios de caracterização física (granulometria, índices de *Atterberg*, massa específica e ensaio expedito das pastilhas), ensaios de resistência (cisalhamento direto) no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC, baseando-se nas seguintes normas:

- i. Análise granulométrica com peneiramento e sedimentação com base na NBR 7181/1984;
- ii. Determinação da massa específica a partir da NBR 6508/1984;
- iii. Limites de *Atterberg* com base na NBR 6459/1984 correspondente ao limite de liquidez e na NBR 7180/1984 correspondente ao limite de plasticidade;

- iv. Ensaio das pastilhas para a identificação expedita MCT (Miniatura Compactada Tropical) do solo. A classificação de cada grupo MCT foi realizada segundo Nogami e Villibor (1994; 1995);
- v. Cisalhamento direto com base na norma ASTM D3080-04.

Com base nos resultados de caracterização os solos foram classificados segundo os métodos convencionais da *American Association of State Highway and Transportation Officials* AASHTO (1945), pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos, SUCS (1952) e segundo o método expedito das pastilhas (específico para solos tropicais).

Os ensaios de cisalhamento direto para a obtenção dos parâmetros de coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo, em termos de tensões totais, foram realizados na condição drenada a uma velocidade de $0,005 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, verificada a partir da equação empírica de Bishop e Henkel (1962), utilizando dados do ensaio de adensamento realizado na amostra com o maior percentual de argila. Os ensaios foram realizados na condição inundada, a fim de simular uma condição crítica de campo, devido à ocorrência de chuva. Para determinação da envoltória de Mohr-Coulomb, foram utilizadas tensões verticais de 32kPa, 76kPa, 124kPa e em alguns casos 250kPa, compondo de três a quatro estágios de consolidação.

Além das coletas das amostras de solo, o trabalho em campo permitiu observações referentes a vegetação, origem do solo, (diferenciando-o em residual e depósito de encosta) e a verificação dos tipos de materiais mobilizados na instabilização. A verificação da tipologia dos movimentos de massa, especialmente daqueles que ocasionaram as rupturas dos fluxos, foi dificultada devido a complexidade dos fenômenos do tempo transcorrido entre a sua ocorrência e as vistorias realizadas para esse estudo (realizadas em 2010 e 2012). No entanto, em determinadas ocorrências pôde-se observar que a zona de ruptura encontrava-se paralela à encosta, caracterizando escorregamentos translacionais.

Também foram catalogadas no BD informações quanto a ocorrência dos movimentos de massa, dentre as quais citam-se: a data de ocorrência, a localidade atingida, precipitação, superfície de escorregamento e danos causados pelos movimentos. Estas informações foram coletadas dos trabalhos mencionados no item 4.3.3 e de entrevistas com o Sr. Jonas Corrente, representante da Defesa Civil do município de Rio dos Cedros/SC, e quando possível verificadas em campo.

O BD é acessado de forma simples e interativa, sendo possível obter todas as informações referentes aos movimentos de massa utilizando a ferramenta *Identity* do ArcGis9.2.

4.2.4 Modelagem dos escorregamentos translacionais

Para a análise de estabilidade da bacia do Rio Cunha, foi utilizado o modelo SHALSTAB que, em termos gerais, integra um modelo hidrológico a um de estabilidade de encosta visando o mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais. Este modelo considera dados hidrológicos e propriedades geotécnicas e físicas do solo, representativos para área em estudo, na determinação da razão entre a quantidade de chuva e a transmissividade do solo necessária para tornar instável uma encosta.

No presente estudo o SHALSTAB foi executado no *software ArcView 3.2a*. Os dados de entrada utilizados no modelo foram divididos em parâmetros de solo e variáveis espaciais topográficas. Os parâmetros de solo foram determinados por meio de ensaios de laboratório e investigações de campo. As variáveis topográficas foram determinadas com base no MDE e consistiram no mapa de declividade e área de contribuição. Desta forma, o modelo determina a instabilidade de cada *pixel* do MDE. A Tabela 10 apresenta os dados de entrada do modelo, associados aos seus respectivos símbolos e unidades.

Tabela 10 – Dados de entrada do modelo SHALSTAB

	z	Espessura	m
Parâmetros do solo	c'	Coesão efetiva	$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$
	φ'	Ângulo de atrito efetivo	graus
	ρ_s	Densidade do solo	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Variáveis espaciais topográficas	θ	Ângulo de declividade	graus
	a	Área de contribuição	m^2
	b	Comprimento de contorno	m

A Figura 34 ilustra os dados de entrada e os procedimentos essenciais adotados pelo SHALSTAB na predição de áreas instáveis, tais procedimentos serão posteriormente explicados nos itens 4.2.1 e subsequentes.

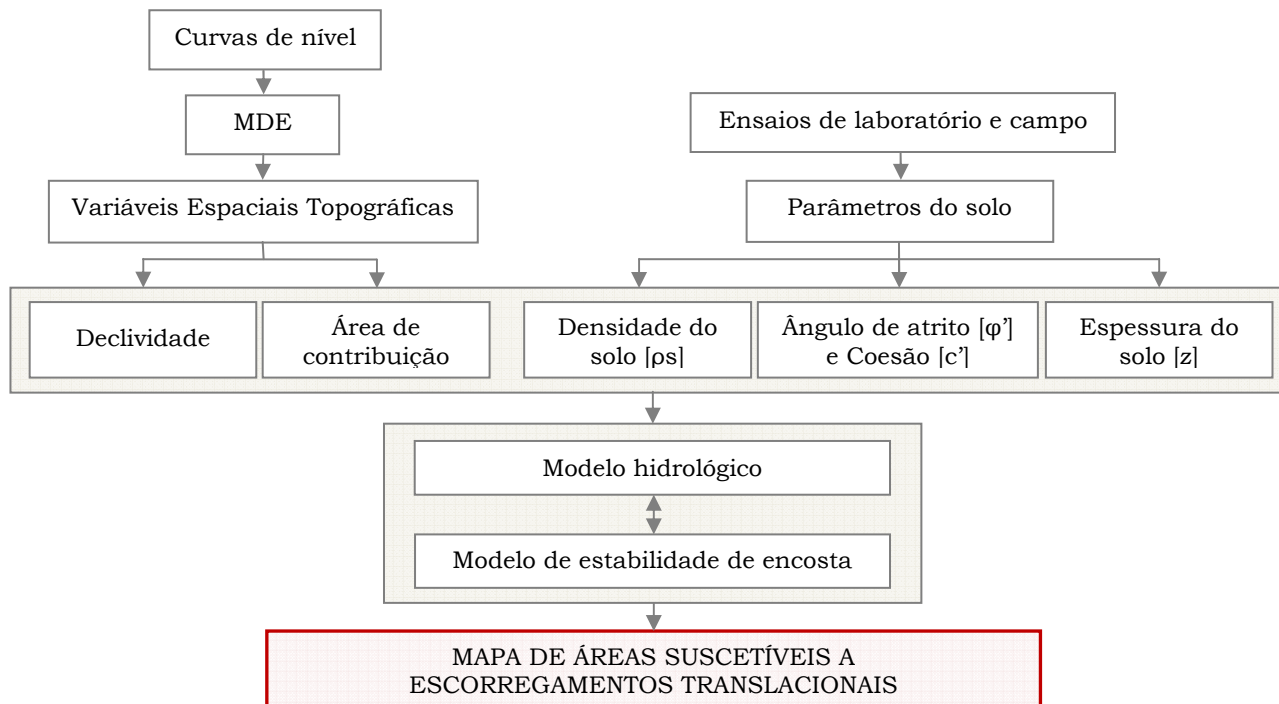


Figura 34 – Aplicação do modelo SHALSTAB

4.2.4.1 Modelo de estabilidade de encosta infinita

O modelo de estabilidade que compõe o SHALSTAB é baseado na teoria do talude infinito, a qual é utilizada na determinação de fatores de segurança de uma encosta. Este método considera uma extensão ilimitada de solo sobre uma superfície inclinada, bem como o fluxo de água paralelo a esta superfície. Assim, com base nestas considerações o método mostra-se coerente para a representação de escorregamentos translacionais. Segundo Guimarães (2000), este modelo simula a estabilidade de uma massa de solo que apresenta contato direto com o maciço rochoso e que se encontra em regiões onde o comprimento da encosta é superior a espessura do solo.

Na teoria do talude infinito a resistência ao cisalhamento do solo é dada segundo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, podendo ser expressa com base na tensão efetiva pela expressão:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \cdot \operatorname{tg}(\varphi') \quad (1)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento do solo [kPa]; σ é a tensão normal do solo no momento de ruptura [kPa]; μ é a poropressão; φ' é o ângulo de atrito efetivo entre os grãos [graus]; e c' é a coesão efetiva [kPa].

A partir da análise do talude infinito a equação (1) pode ser escrita como:

$$\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \operatorname{sen} \theta = c' + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta - \rho_w \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 \theta) \cdot \operatorname{tg}(\varphi') \quad (2)$$

onde ρ_s é a densidade do solo [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; ρ_w é a densidade da água [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; g é a aceleração gravitacional [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]; z é a espessura do solo [m]; θ é o ângulo de declividade [graus]; e h é o nível do lençol freático [m].

O modelo SHALSTAB expressa a equação (2) em função de $h \cdot z^{-1}$, denominada proporção da coluna de solo saturado, segundo a equação (3). Esta equação pode ser representada desconsiderando a coesão, conforme descrita na equação (4).

$$\frac{h}{z} = \frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \operatorname{tg}(\varphi')} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \varphi'}\right) \quad (3)$$

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \varphi'}\right) \quad (4)$$

4.2.4.2 Modelo hidrológico

O modelo hidrológico é baseado nos princípios de Beven e Kirkby (1979) os quais demonstram que a saturação de um solo, em função da topografia, está relacionada com a área de drenagem (a) por unidade de contorno (b) dividida pela declividade da encosta. A partir destes estudos O'Loughlin (1986) estabelece um índice que determina a condição de saturação de um solo, sendo este função da precipitação, transmissividade do solo, declividade e da área de contribuição a montante, ou seja, área drenada por uma unidade de contorno. Este índice define que nos locais onde o fluxo de água recebido supera a capacidade do solo em transmiti-lo ocorre a saturação do solo e pode ser expresso pela equação (5).

$$W = \frac{Q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \operatorname{sen} \theta} \quad (5)$$

onde W é o índice de umidade [adimensional]; Q é a intensidade da chuva [mm]; T é a transmissividade de solo [$\text{m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$]; a é a área de contribuição [m^2]; e b é o comprimento de contorno [m].

Montgomery e Dietrich (1994) expressam a equação (5) em função da razão $h \cdot z^{-1}$ de acordo com a equação (6).

$$\frac{h}{z} = \frac{Q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \operatorname{sen} \theta} \quad (6)$$

O modelo considera um estado de equilíbrio hidrológico e determina que o caminho que a água percorre, após infiltrar-se até o plano de menor condutividade é determinado pela topografia. Normalmente este plano é aquele definido pelo contato entre o solo e o maciço rochoso. Desse modo, a razão topográfica ilustrada

na equação (7) representa o acúmulo de fluxo em uma determinada região.

$$\frac{a}{b \cdot \text{sen} \theta} \quad (7)$$

Observa-se que a razão $h \cdot z^{-1}$ no modelo hidrológico representa a altura da coluna de água saturada e no modelo de estabilidade os locais onde serão desencadeados os escorregamentos.

4.2.4.3 Modelo de estabilidade acoplado ao hidrológico

A combinação entre os dois modelos considerando a coesão é efetuada igualando-se as equações (3) e (6), ambas em função de $h \cdot z^{-1}$. Isto resulta na equação (8).

$$Q = \frac{T}{a/b} \cdot \text{sen} \theta \cdot \frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \text{tg}(\varphi)} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \varphi}\right) \quad (8)$$

Ainda igualando-se as equações (4) e (6) obtém-se a equação () a qual desconsidera a coesão do solo.

$$Q = \frac{T}{a/b} \cdot \text{sen} \theta \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \varphi}\right) \quad (9)$$

As equações (8) e (9) podem ser reescritas em função da razão $a \cdot b^{-1}$ e também pelo parâmetro hidrológico $Q \cdot T^{-1}$. Para a modelagem das áreas de instabilidade desta bacia foi considerado o último parâmetro, pois a espacialização da transmissividade do solo compõe um procedimento oneroso, como descrito por Montgomery e Dietrich (1998). Estes autores recomendam que para o cálculo de $Q \cdot T^{-1}$ é necessário utilizar valores em escala logarítmica, pois esta razão apresenta valores pequenos.

O modelo SHALSTAB, nas análises de instabilidade onde é desconsiderada a coesão, utiliza a equação (10) para a determinação da suscetibilidade de escorregamento de cada *pixel* do MDE.

$$\log \frac{Q}{T} = \frac{\text{sen} \theta}{a/b} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \varphi}\right) \quad (10)$$

Na equação (10) as variáveis área de contribuição e declividade correspondem a um mapa que espacializa esses dados, no entanto, os valores de ρ_s , ρ_w e φ são constantes para toda a área. O comprimento de contorno foi definido na elaboração do MDE.

A modelagem realizada considerando a coesão do solo emprega a equação (11) para o cálculo de instabilidade.

$$\log \frac{Q}{T} = \frac{\text{sen}\theta}{a/b} \cdot \left[\frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \text{tg}(\varphi)} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\varphi}\right) \right] \quad (11)$$

Na equação (11) o parâmetro $c'z^{-1}$ é constante ao longo de toda a área, sendo os demais parâmetros correspondentes àqueles utilizados na equação (10).

Por fim, a Tabela 11 ilustra as classes de estabilidade geradas pelo modelo, na qual a razão $a \cdot b^{-1}$ representa a área drenada por unidade de contorno e $Q \cdot T^{-1}$ a razão hidrológica (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998). Estas classes são utilizadas na classificação de cada *pixel* gerando o mapa de suscetibilidade.

Dietrich e Montgomery (1998) elaboraram classes de estabilidade para a classificação dos valores de $\log(Q \cdot T^{-1})$, agrupando os valores considerados incondicionalmente estáveis, de acordo com a equação (13), e aqueles incondicionalmente instáveis, de acordo com equação (27). A partir dos dados aferidos, os autores dividiram os valores intermediários em classes de transição, de acordo com a proximidade daquelas incondicionalmente estáveis ou instáveis. Observa-se que, para a classe incondicionalmente instável, o local é instável mesmo se o solo estiver seco, ou seja, $h \cdot z^{-1}$ igual a zero, e que, para a classe incondicionalmente estável, mesmo se o local estiver saturado, não ocorrerá escorregamento. Salienta-se, ainda, que $Q \cdot T^{-1}$ é diretamente proporcional a instabilidade do local.

Tabela 11 – Classes de estabilidade geradas pelo SHALSTAB

Classes	Condições	Equações
Incondicionalmente estável e saturado	$\frac{a}{b} > \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$	Equação (12)
	$\text{tg}\theta \leq \text{tg}\varphi' \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)$	Equação (13)
Incondicionalmente estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$	Equação (14)
	$\text{tg}\theta \leq \text{tg}\varphi' \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)$	Equação (15)
Estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\varphi'}\right) \cdot \frac{T}{Q} \cdot \text{sen}\theta$	Equação (16)
	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$	Equação (17)
	$\text{tg}\varphi' \cdot \left(\frac{1 - \delta_w}{\delta_s}\right) < \text{tg}\theta < \text{tg}\varphi'$	Equação (18)
Instável e não saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\varphi'}\right) \cdot \frac{T}{Q} \cdot \text{sen}\theta$	Equação (19)
	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$	Equação (20)
	$\text{tg}\varphi' \cdot \left(1 - \frac{\delta_w}{\delta_s}\right) < \text{tg}\theta < \text{tg}\varphi'$	Equação (21)
Instável e saturado	$\frac{a}{b} > \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\varphi'}\right) \cdot \frac{T}{Q} \cdot \text{sen}\theta$	Equação (22)
	$\frac{a}{b} > \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$	Equação (23)
	$\text{tg}\varphi' \cdot \left(1 - \frac{\delta_w}{\delta_s}\right) < \text{tg}\theta < \text{tg}\varphi'$	Equação (24)
Incondicionalmente instável e não saturado	$\text{tg}\theta > \text{tg}\varphi'$	Equação (25)
	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$	Equação (26)
Incondicionalmente instável e saturado	$\text{tg}\theta > \text{tg}\varphi'$	Equação (27)
	$\frac{a}{b} > \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$	Equação (28)

Fonte: Modificado de Guimarães (2000)

4.2.4.4 Parâmetros do solo

Conforme mencionado anteriormente, as variáveis: coesão efetiva (c'), ângulo de atrito efetivo (ϕ'), densidade do solo (ρ_s) e espessura do solo (z) compõem os dados relativos aos solos relevantes nessa modelagem. Na determinação destes parâmetros, excluindo o z , foram realizados ensaios de cisalhamento direto (CD) em seis amostras indeformadas de solos residuais, que foram coletadas em locais próximos às zonas de rupturas, ou seja, no topo de dois escorregamentos translacionais. Os ensaios de CD foram realizados conforme elucidado no item 4.2.3.4.

Seis amostras foram submetidas ao ensaio de CD, gerando seis conjuntos de dados geotécnicos (c' , ϕ' e ρ_s), aumentando, dessa forma, a representatividade dos parâmetros obtidos. No entanto, para a modelagem esses parâmetros são constantes para toda a área.

A espessura do solo foi verificada por meio de observações em campo e sondagem utilizando um trado manual. A sondagem, ou perfuração do solo, também foi executada no topo de um movimento de massa, visando atingir o substrato rochoso, identificando, desta forma, a profundidade vertical do solo (z). No entanto, devido à dificuldade de acesso ao local de estudo não foi possível alcançar o substrato rochoso e o valor obtido corresponde a profundidade alcançada na sondagem e não à profundidade total do solo. Além disso, em virtude da grande variabilidade deste parâmetro na área, determinou-se um intervalo de valores capaz de representar as diferentes profundidades identificadas em campo.

4.2.4.5 Variáveis espaciais topográficas

As variáveis áreas de contribuição (a) e o ângulo de declividade (θ) correspondem, respectivamente, aos atributos hidrológicos e topográficos da bacia, obtidos a partir de mapas derivados do modelo digital de elevação (MDE), os quais espacializam esses dados na modelagem. O comprimento de contorno (b) está relacionado ao tamanho do pixel, que na etapa de geração do MDE foi definido igual a 15m.

O mapa de declividade foi elaborado em graus por meio da ferramenta *Shaltopo* do SHALSTAB e representa a distribuição do relevo na bacia, estando também relacionado aos processos que regem a instabilidade e a ocupação das encostas.

Por sua vez, o mapa de área de contribuição foi confeccionado por meio da ferramenta *Shaltopo* (*Contributing Area*) do SHALSTAB, que utiliza um algoritmo baseado na metodologia de Quinn et al. (1991, *apud* GUIMARÃES, 2000) que calcula a área de contribuição de cada célula (*pixel*) pelo método do fluxo distribuído. Nesse algoritmo, o fluxo de água a montante é distribuído às células a jusante proporcionalmente as suas declividades. O parâmetro área de contribuição está relacionado com a rede de drenagem da bacia e incorpora ao modelo SHALSTAB a influência das porções côncavas do relevo nos caminhos em que a água percorre, os quais são identificados como locais potenciais de saturação e, logo, de instabilidade.

4.2.5 Elaboração do mapa de suscetibilidade

Considerando a caracterização geotécnica das seis amostras de solos residuais e os valores da profundidade do solo foram obtidos 48 conjuntos de dados para as simulações com o modelo SHALSTAB.

A identificação da simulação que melhor representa o cenário de instabilidade na bacia leva em consideração os locais atingidos pelos movimentos de massa ocorridos no mês de novembro de 2008. Estes locais foram identificados com base na interpretação visual de fotografias aéreas, permitindo a delimitação das cicatrizes evidenciadas, conforme descrito no item 4.2.3.3.

Como o modelo SHALSTAB simula os locais onde ocorre a desagregação do material, denominadas zonas de rupturas, foi considerada somente a delimitação desta porção da cicatriz e somente aquelas correspondentes a escorregamentos do tipo translacional.

Logo, a partir da sobreposição das cicatrizes sobre o mapa de instabilidade foi possível verificar a distribuição espacial dos escorregamentos na bacia, e constatar se os

mesmos encontram-se nas categorias de menores valores de $Q \cdot T^{-1}$ (classes mais instáveis) definidas pelo SHALSTAB. Esta constatação visa a comparação dos resultados da simulação com a real situação em campo.

Evidencia-se que a ocorrência de todos os escorregamentos em classes instáveis não é suficiente para a escolha da melhor simulação, pois a variação dos parâmetros geotécnicos, bem como da profundidade do solo, podem gerar percentuais de instabilidade elevados e incoerentes com a situação em campo. Sendo assim, a melhor simulação é aquela que classifica todos os escorregamentos nos menores valores de $Q \cdot T^{-1}$ em um menor percentual de área instável.

Além disso, para a escolha da melhor simulação foi considerado o método de comparação entre a distribuição dos valores de $Q \cdot T^{-1}$ dos escorregamentos mapeados e daqueles criados por uma distribuição aleatória tendenciosa, conforme sugerido pelo modelo. Nesta análise o modelo distribui nas classes de estabilidade os menores valores de $Q \cdot T^{-1}$ de cada ocorrência, mapeada e aleatória, permitindo a comparação entre elas, sendo que, quanto maior a diferença entre estas distribuições melhor o desempenho do modelo.

Desta forma, foi definida a melhor simulação e o grau de suscetibilidade a escorregamentos translacionais, determinado e representado na forma de um mapa com resolução espacial de 15m, classificado em função das sete classes de estabilidade definidas pelo SHALSTAB.

A partir deste mapa pode-se correlacionar as classes de instabilidade com os parâmetros de uso e ocupação do solo, declividade, altitude e fatores geológico-geotécnicos, por meio da sobreposição de mapas (mapa de suscetibilidade e mapas temáticos), bem como avaliar a influência dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e profundidade nestas classes.

5 RESULTADOSE DISCUSSÕES

5.1 Mapas topográficos

Os mapas de altitude (Figura 16) e de declividade (Figura 17) foram reclassificados em intervalos de 50 em 50m (Figura 35) e de 5 em 5° (Figura 36), respectivamente.

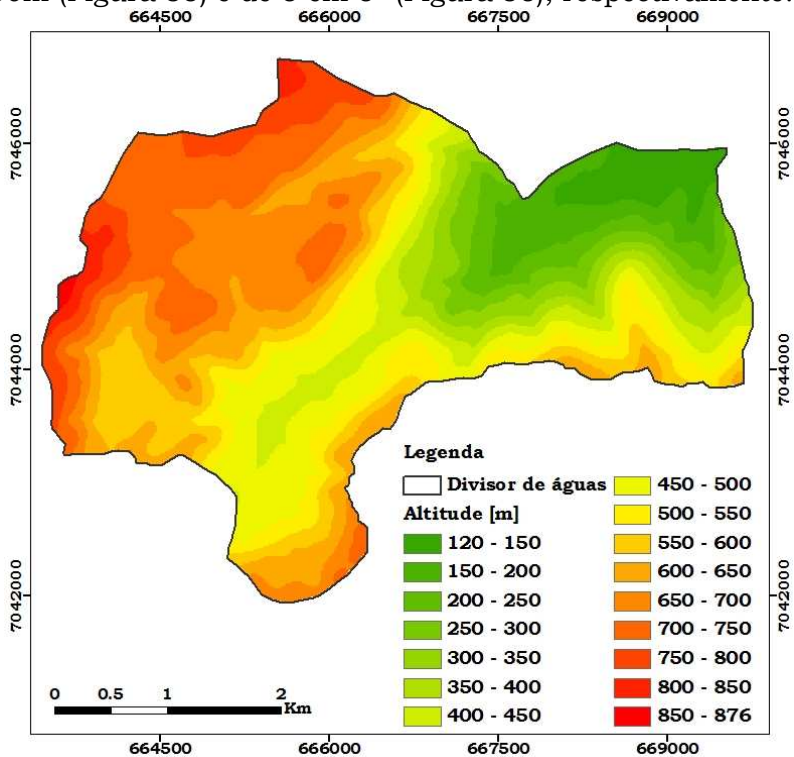


Figura 35 – Classes de altimetria de 50 em 50m

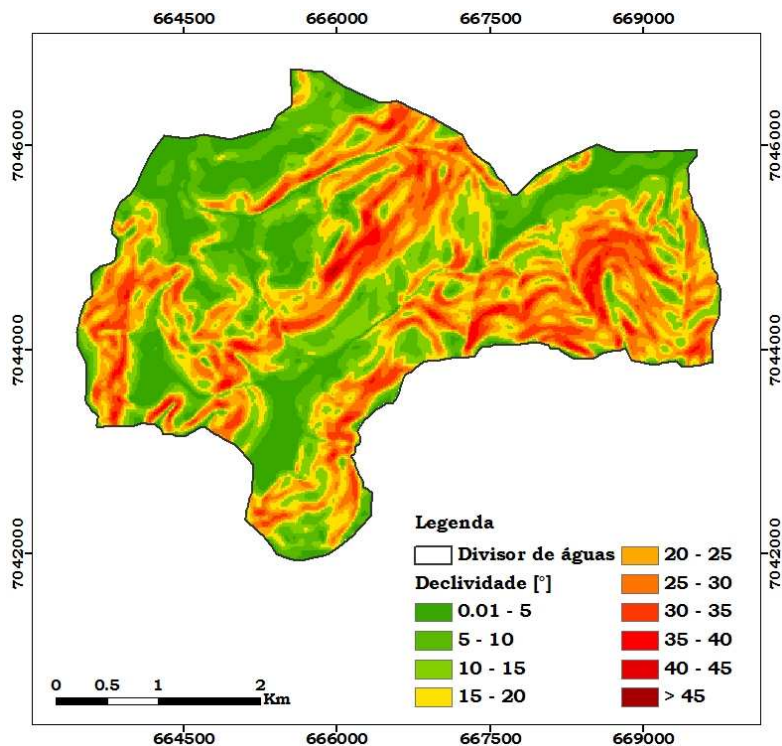


Figura 36 – Intervalos de declividade de 5 em 5°

Esses intervalos de classes permitiram verificar as faixas de altitude e de declividade predominantes na bacia, conforme mostra a Tabela 12 e a Tabela 13. Também gerou subsídios para a caracterização das áreas instáveis da bacia.

Tabela 12 – Intervalos de altitude e respectivas áreas

Altitude [m]	[%]	Área [km ²]
120 - 150	3,61	0,58
150 - 200	4,71	0,76
200 - 250	3,73	0,60
250 - 300	3,78	0,61
300 - 350	3,71	0,60
350 - 400	4,05	0,65
400 - 450	6,72	1,08
450 - 500	12,07	1,95
500 - 550	7,75	1,25
550 - 600	9,59	1,55
600 - 650	10,26	1,66
650 - 700	11,88	1,92
700 - 750	11,68	1,88
750 - 800	4,76	0,77
800 - 850	1,49	0,24
850 - 876	0,20	0,03
Total	100	16,13

Tabela 13 – Intervalos de declividade e respectivas áreas

Declividade [°]	[%]	Área [km ²]
0,01 - 5	14,43	2,328
5 - 10	15,41	2,486
10 - 15	15,69	2,531
15 - 20	15,52	2,503
20 - 25	14,01	2,260
25 - 30	9,66	1,558
30 - 35	7,71	1,243
35 - 40	5,80	0,935
40 - 45	1,76	0,284
> 45	0,01	0,002
Total	100	16,13

Com base na Tabela 12 verifica-se que 75% da área da bacia encontra-se em altitudes que variam de 400 a 800m. Analisando a Figura 36 e a Tabela 13 verifica-se que a bacia apresenta declividades inferiores a 30°. Entretanto, 11% da área apresenta locais com declividades acentuadas, chegando a ultrapassar 30°, acima da qual há restrição de uso e ocupação do solo, sendo destinadas a áreas de preservação permanente, conforme o plano diretor vigente no município de Rio dos Cedros. Salienta-se que os

locais onde as encostas são íngremes estão mais propensos a ocorrência de movimentos de massa.

5.2 Mapa de uso e ocupação do solo

A Figura 37 mostra o mapa de uso e cobertura do solo, antecedente à ocorrência dos movimentos de massa. No mapa estão representados os diferentes usos e coberturas do solo da bacia do Rio Cunha e os percentuais que cada um representa em relação à área total da bacia (16,13km²).

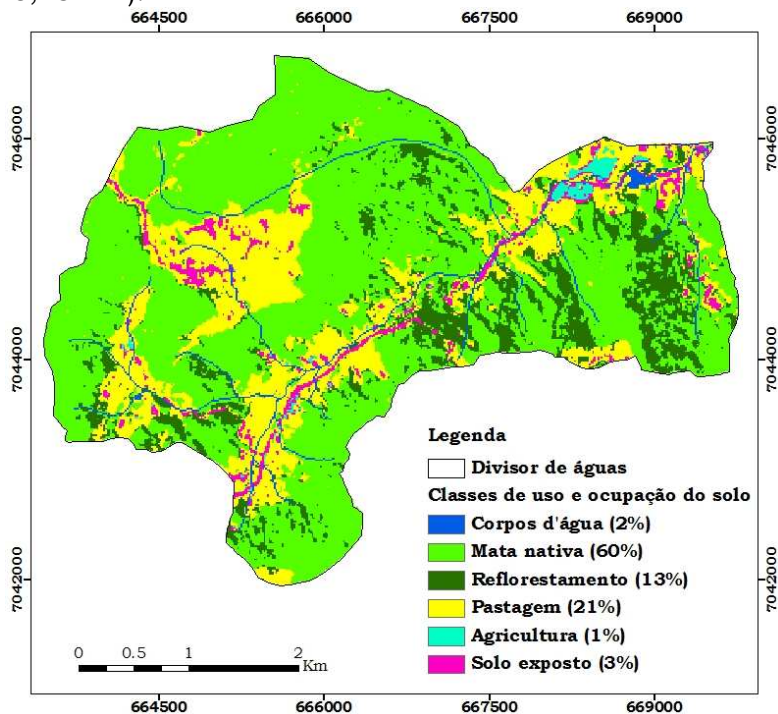


Figura 37 – Mapa de uso e ocupação do solo do ano de 2006

Verifica-se que 73% da área de estudo é coberta por floresta, sendo 60% de floresta nativa primária e 13% de reflorestamento com espécies exóticas (eucalipto e pinus). O restante da área é ocupado por pastagem (3,40km²), solo exposto (0,55km²), agricultura (0,13km²) e corpos d'água

(0,36km²). A Figura 38 mostra a composição da paisagem na bacia.



Figura 38 – Vegetação nativa, pastagem e plantação de eucalipto e pinus na bacia do Rio Cunha

A bacia em estudo é predominantemente rural e caracterizada por uma agricultura de subsistência onde são cultivados arroz (Figura 39), banana, milho e cana de açúcar e pequenos reflorestamentos de pinus, eucalipto e palmito.



Figura 39 – Área de rizicultura circundada por pastagem e mata nativa na bacia do Rio Cunha

Observa-se que atividades de pecuária e cultivo agrícola nas condições de relevo, solo e clima da área, praticadas sem o manejo adequado do solo, aceleram os processos erosivos e tendem a desestabilizar a encosta como pode ser observado na Figura 40.



Figura 40 – Área de pastagem em processo de instabilização

5.3 Mapeamento geotécnico

5.3.1 Mapa geotécnico preliminar

O mapeamento geotécnico possibilita prever o comportamento geomecânico dos solos a partir da estimativa de unidades geotécnicas.

No mapeamento proposto foi necessária a elaboração do mapa litológico. Neste mapa, como mencionado anteriormente, as unidades litológicas estão relacionadas aos domínios geológicos e representam a rocha predominante. A Tabela 14 apresenta a litogia adotada para cada domínio geológico e a Figura 41 ilustra o mapa litológico em escala 1:100.000, onde estão evidenciadas as rochas predominantes e os seus percentuais de abrangência.

Tabela 14 – Litologia relacionada à geologia

Geologia ¹	Sigla ¹	Litologia adotada ¹	Sigla ²
Formação Mafra	CPm	Arenito	a
Complexo Luís Alves	Ala	Gnaiss granulítico	gn
Sedimentos aluvionares	QHa	Sedimentos quaternários	sq

Fonte: (1) IBGE (2003), (2) Davison Dias (2001)

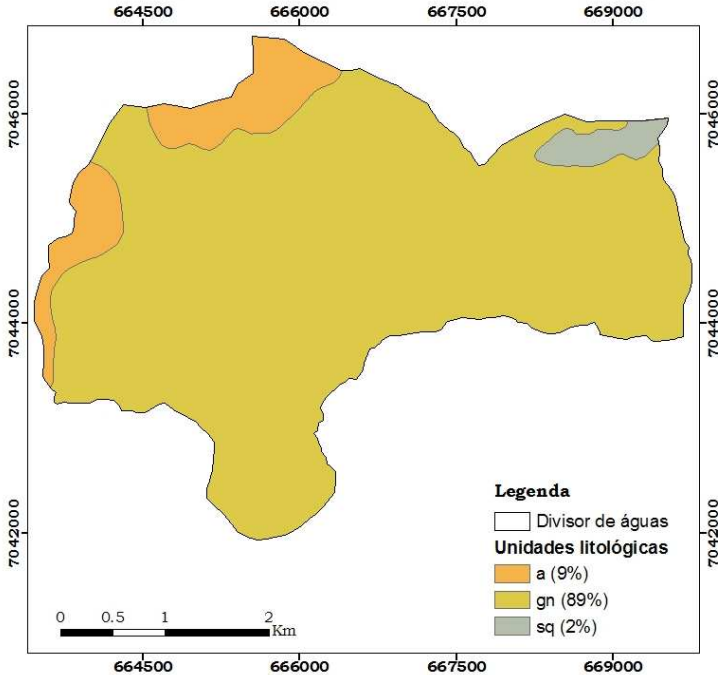


Figura 41 – Mapa Litológico da bacia

O mapa litológico da bacia em estudo é composto por três unidades (arenito, sedimentos quaternários e gnaiss granulítico), sendo que, o gnaiss granulítico predomina, correspondendo a 89% da área. Ao cruzar os polígonos que representam as referidas unidades com aqueles correspondentes às unidades pedológicas (Figura 11), obteve-se o mapa apresentado na Figura 42 em escala 1:100.000, que contempla oito unidades geotécnicas preliminares, com seus respectivos percentuais.

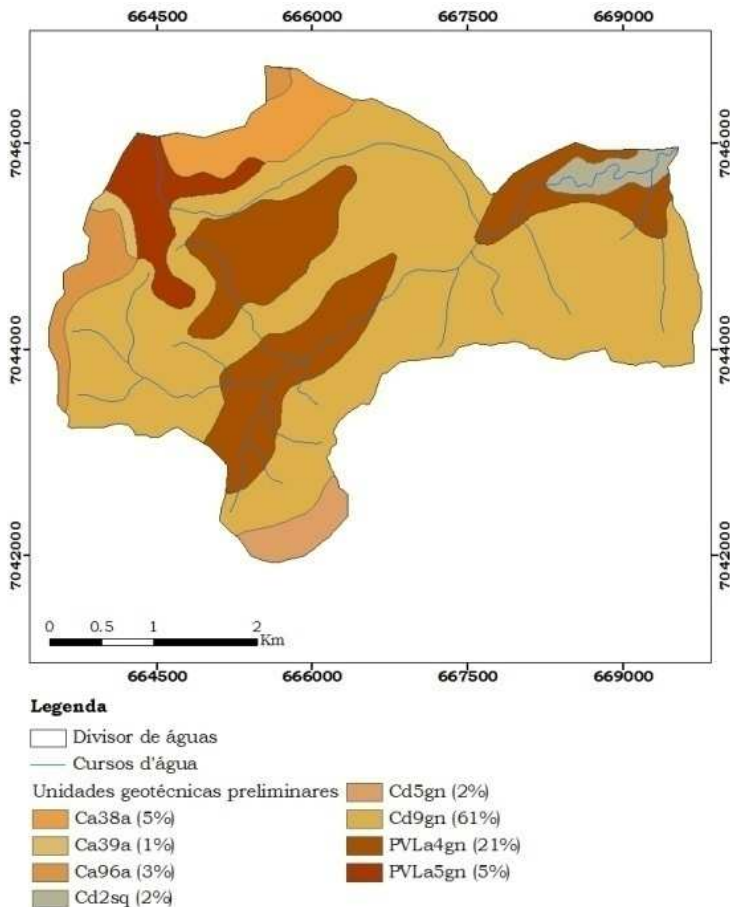


Figura 42 – Mapa geotécnico preliminar

Analisando os polígonos gerados, observou-se divergência entre a pedologia e a litologia na unidade Cd2sq, que pode ser atribuída a incompatibilidade entre os mapas cartográficos originais. Por estar localizada no exutório da bacia, zona típica de acumulação de sedimentos, e ainda por apresentar a formação geológica sq, onde os solos são constituídos por sedimentos aluvionares, cascalheira, areias e sedimentos siltico-argilosos, esta unidade passou a ser denominada Asq,

onde o A representa solos classificados como aluviais na metodologia de Davison Dias (1995).

Com o auxílio do banco de dados associado ao mapa geotécnico preliminar, as unidades geotécnicas preliminares formadas pelo mesmo tipo de solo e litologia foram identificadas e agrupadas conforme ilustrado na Tabela 15, simplificando o mapa geotécnico preliminar. Em seguida, as unidades foram submetidas ao ajuste com as curvas de níveis mais próximas aos seus contornos originais, a fim de adequá-las à escala 1:50.000 (Figura 43).

Tabela 15 – Simplificação das unidades geotécnicas preliminares

Unidade geotécnica preliminar	Classe do solo	Litologia	Unidade geotécnica simplificada
PVL4gn PVL5gn	PVL	gn	PVLgn
Ca38a Ca39a	C	a	Ca
Ca96a Cd5gn Cd9gn		gn	Cgn
Asq	A	sq	Asq

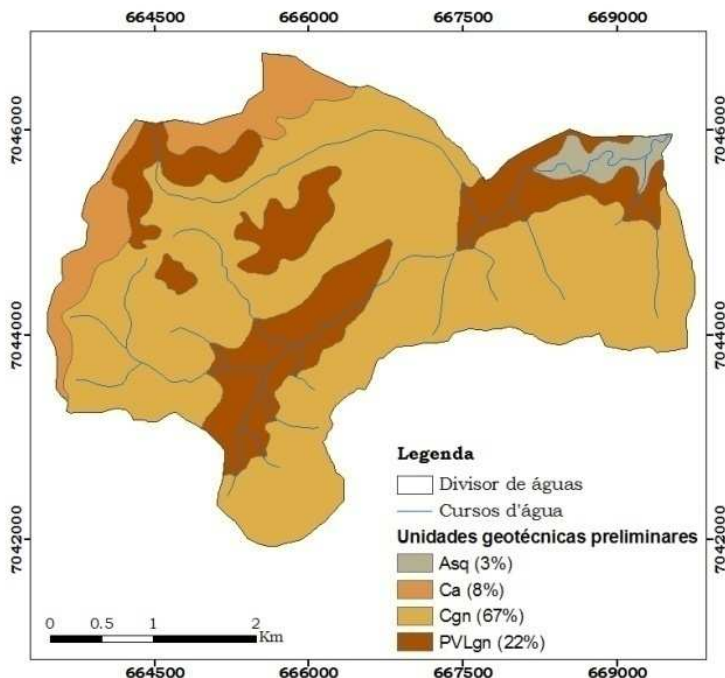


Figura 43 – Mapa geotécnico preliminar simplificado

Após as referidas correções e ajustes, verifica-se que a bacia é formada por quatro unidades geotécnicas preliminares distintas: Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico de origem gnaíse granulítica (PVLgn), Cambissolo com substrato de arenito (Ca), Cambissolo formado por gnaíse granulítico (Cgn) e Solos Aluviais originários de sedimentos quaternários (Asq).

O mapa geotécnico preliminar simplificado, apesar de ter sido ajustado às curvas de níveis, apresenta escala 1:100.000. Para melhorar a escala do mapeamento, foram realizadas investigações em campo, definindo-se as ocorrências de solos sedimentares e residuais na bacia, conforme item subsequente.

5.3.2 Mapa geotécnico preliminar modificado

A determinação das áreas correspondentes a cada grupo de solo (sedimentar ou residual) baseou-se no mapa

geotécnico preliminar simplificado (Figura 43) e na classificação de amostras de solo coletadas nas unidades PVLgn e Asq, resultando no mapa geotécnico preliminar modificado ilustrado na Figura 44.

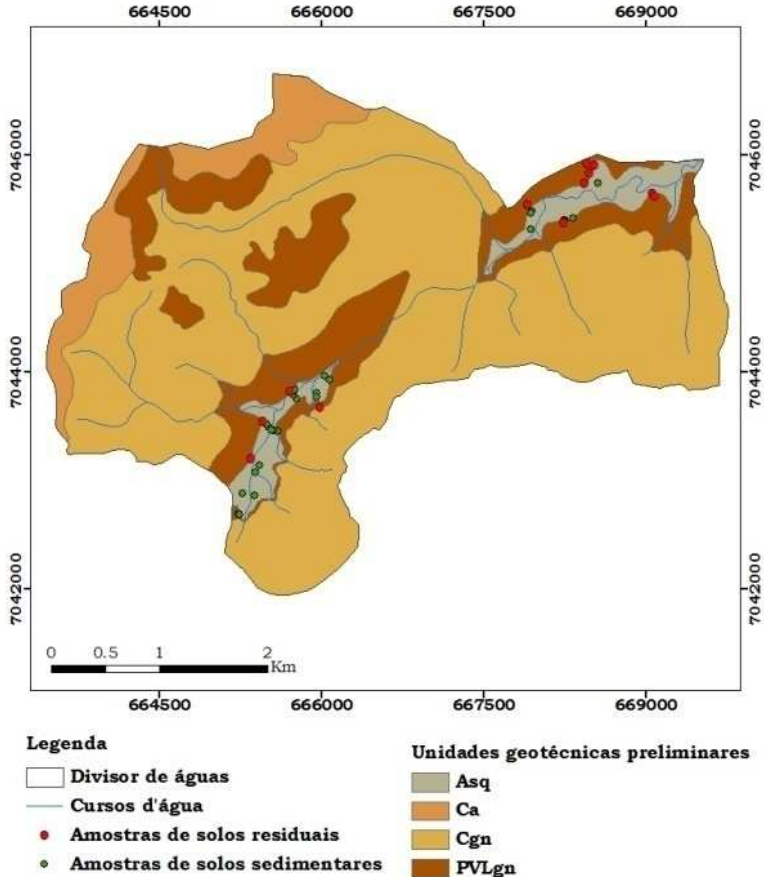


Figura 44 – Mapa geotécnico preliminar modificado

Com base neste mapa podem ser visualizadas as unidades geotécnicas que compõem os solos de origem residual (Ca, Cgn e PVLgn) e sedimentar (Asq). Foi observado que determinadas áreas, classificadas no mapa da Figura 43 como Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico com substrato de gnaiss granulítico (PVLgn), representam solos sedimentares, de acordo com as amostras

analisadas. A Tabela 16 apresenta a área e o percentual de abrangência de cada grupo na bacia em estudo, evidenciando a predominância (94%) dos solos residuais. Deste percentual, 67% correspondem à unidade Cambissolo de gnaiss granulítico.

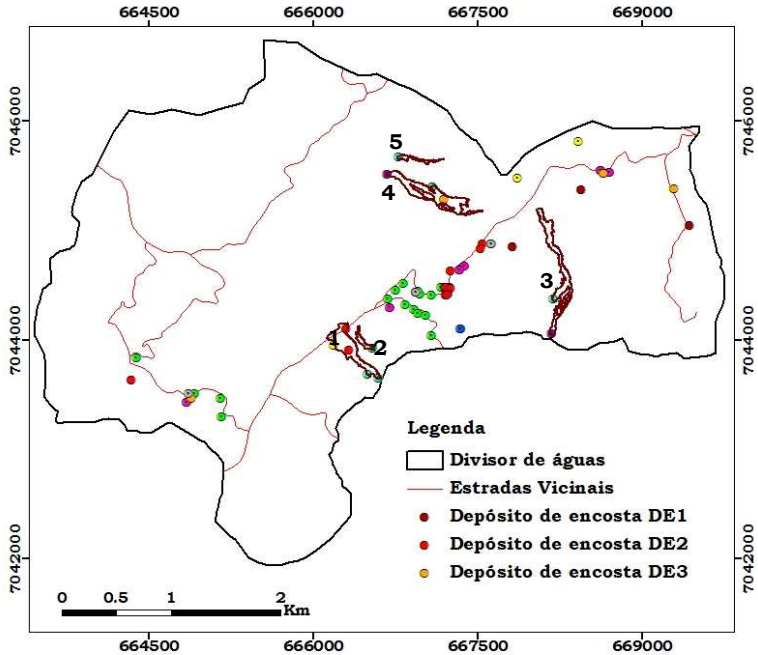
Tabela 16 – Abrangência dos solos residuais e sedimentares na bacia

Grupo de solo	Unidade Geotécnica	Área [km ²]	Percentual [%]
Sedimentar	Asq	0,9	6
	Ca	1,3	8
Residual	Cgn	10,8	67
	PVLgn	3,1	19

Para a classificação das amostras foram considerados dados provenientes de ensaios expeditos, mapas e observações em campo, a partir dos quais foram elaboradas as tabelas ilustradas no Anexo V, que apresentam as características predominantes dos solos analisados e do meio onde estão presentes. Dos solos analisados, 12 foram classificados como solos residuais e 33 como sedimentares.

5.3.3 Mapa de inventário dos movimentos de massa

O mapa de inventário dos movimentos de massa (Figura 45) apresenta as ocorrências dos depósitos de encostas (identificando locais passíveis de movimentações) e ilustra a distribuição espacial dos movimentos na bacia. Também identifica os fenômenos de origem natural ou induzida, deflagrados especialmente durante períodos chuvosos em novembro de 2008, fevereiro de 2010 e 2012.



Legenda

- Cicatrizes dos fluxos de detritos (1,2,3,4 e 5)
- Escorregamento complexo de origem natural
- Escorregamentos de origem induzida
- Escorregamento rotacional de origem induzida
- Escorregamento translacional de origem induzida
- Rastejo
- Rupturas dos fluxos de detritos de origem induzida
- Rupturas dos fluxos de detritos de origem natural

Figura 45 – Mapa de inventário dos movimentos de massa

Os movimentos de caráter natural, decorrentes do evento de 2008, são representados pelas rupturas dos fluxos de detritos que iniciaram em áreas de mata nativa (Figura 46) e por um escorregamento misto de rotacional e translacional.



Figura 46 – Fluxo de detritos de origem natural (cicatriz 1)
Fonte: Acervo pessoal de um dos moradores da localidade

Os movimentos induzidos, classificados predominantemente em escorregamentos rotacionais e translacionais, ocorreram principalmente ao longo das estradas vicinais, isentas de sistema de drenagem (Figura 47 e Figura 48). Também foram observados em depósitos de encostas, em taludes para a construção de residências (Figura 49), plantação de algum tipo de cultura (especialmente no cultivo de banana) e extração de macadame. Estes fenômenos, decorrentes do uso e ocupação do solo inadequado, segundo moradores, foram evidenciados especialmente durante períodos chuvosos. Um destes períodos corresponde ao dia 08 de fevereiro de 2010, onde foram registrados 113mm de chuva durante 45 minutos (CEPED, 2010). Ainda foram identificados fenômenos do tipo rastejo, os quais ocorreram em áreas de pastagem, estando associados à presença de caminhos de gado e de depósitos de encostas. Além disso, dos fluxos de detritos mapeados, aqueles onde a zona de ruptura ocorreu em área de pastagem e em área de reflorestamento de Pinus e Eucalipto foram considerados de origem induzida.



Figura 47 – Escorregamento translacional ao longo da estrada
Fonte: CEPED (2010)



Figura 48 – Ocorrência de escorregamento translacional e ausência de sistema de drenagem na estrada



Figura 49 – Escorregamento rotacional

Fonte: CEPED (2009)

A Figura 50 e Figura 51 ilustram um escorregamento rotacional, onde a presença de bananeiras e a execução de um corte na base da encosta para a abertura do sistema viário foram favoráveis à sua deflagração. Nota-se que a face exposta do corte também comprometeu a estabilidade do local, ficando sujeito à ocorrência de novos escorregamentos.



Figura 50 – Escorregamento rotacional em cultura de banana (área de rejeito)



Figura 51 – Rompimento de talude de corte

Nesse mapeamento, os fluxos de detritos destacaram-se devido à amplitude e alcance que apresentaram. A Tabela 17 apresenta a área, o perímetro e a extensão dos fluxos, que representam as dimensões aproximadas dos movimentos de massa.

Tabela 17 – Dimensões dos fluxos de detritos

Cicatriz	Área [m ²]	Perímetro [m]	Extensão [m]
1	60507	1895	620
2	8544	798	290
3 (B)	63989	4679	1290
4 (A)	70446	3735	944
5	7981	1096	430

Dentre os fluxos mapeados as cicatrizes 3 e 4, referidas no item 2.4 como fluxos de detritos B e A respectivamente, sobressaíram-se pelas suas dimensões. Por este motivo as investigações ocorreram nestes locais.

5.3.4 Identificação da unidade geotécnica suscetível aos movimentos

Com base na sobreposição do mapa de inventário de movimentos de massa (Figura 45) ao mapa geotécnico preliminar modificado (Figura 44), demonstrada na Figura 52, a unidade geotécnica suscetível à ocorrência de movimentos de massa foi definida.

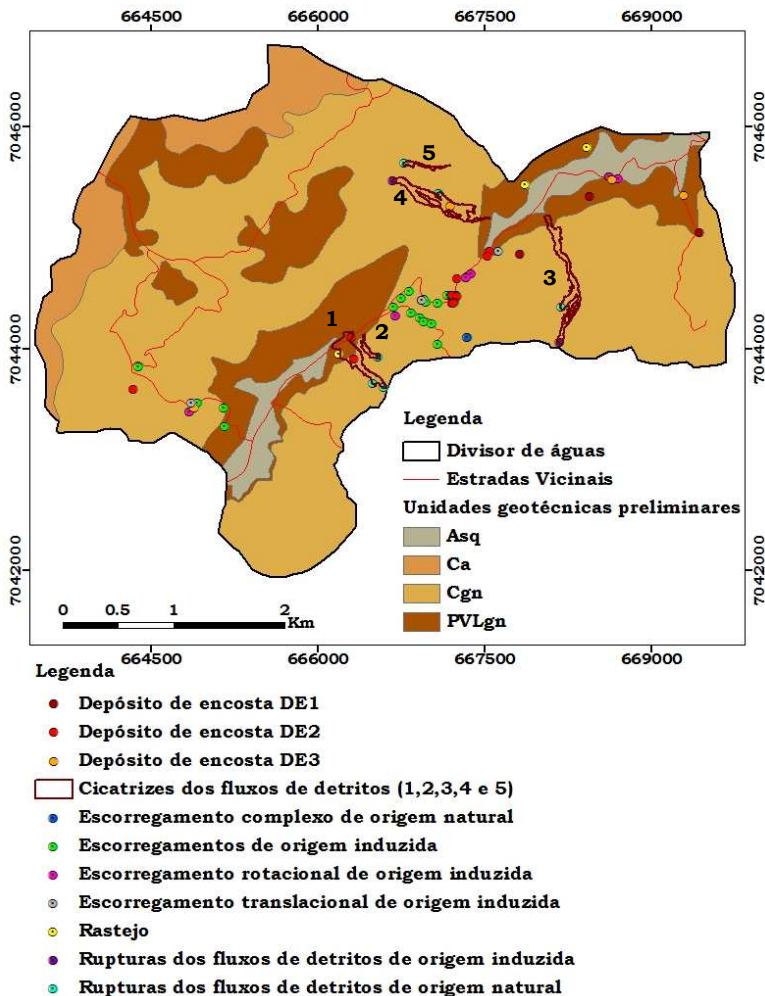


Figura 52 – Sobreposição do mapa de inventário de movimentos de massa ao mapa geotécnico preliminar modificado

Nota-se que dentre as quatro unidades geotécnicas identificadas, a unidade denominada Cgn, além de apresentar a maior área (aproximadamente 10km²), contempla todas as cicatrizes dos fluxos de detritos, bem como a maioria dos demais movimentos e dos depósitos de

encosta. Logo, foi definida como a unidade geotécnica mais suscetível à ocorrência de movimentos de massa da bacia.

5.3.5 Banco de dados (BD) dos fluxos de detritos

Definida a unidade geotécnica suscetível (Cgn) e os fenômenos de destaque na bacia, foi realizada a caracterização dos fluxos de detritos e estruturado um BD com informações topográficas, pluviométricas, de uso e ocupação do solo, geológicas, litológicas, pedológicas, dimensões aproximadas das feições dos movimentos, dentre outras (Tabela 17 ilustrada no item 5.3.3 e Tabela 18). Também, foram inseridas fotografias auxiliando na verificação da classificação do tipo de movimento.

Tabela 18 – Banco de dados dos fluxos de detritos

Cicatriz	1	2	3 (B)	4 (A)	5
Data da ocorrência	24/11/08 a 30/11/2008	24/11/08 a 30/11/2008	24/11/08 a 27/11/2008	24/11/08 a 29/11/2008	25/11/08 a 29/11/2008
Material envolvido	Solo, blocos de rocha e troncos de árvores				
Altitude [m]	R1: 600-650 R2: 550-600	500-550	R1: 600-650 R2: 450-500	R1: 500-550 R2: 300-350	500-550
Desnível [m]	206	68	464	346	209
Declividade [°]	R1: 20-25 R2: 30-35	30-35	R1: 15-20 R2: 25-30	R1: 20-25 R2: 25-30	25-35
Vegetação	R1: Mata nativa R2: Mata nativa	Mata nativa	R1: Pastagem R2: Mata nativa	R1: Mata nativa e reflorestamento de Pinus e Eucalipto R2: Mata nativa	Mata nativa
Unidade geotécnica	Cambissolo de gnaiss granulítico (Cgn)				
Data - Chuva [mm] ¹	24/12/2008 – 50; 25/12/2008 – 11; 26/12/2008 – 34,4; 27/12/2008 – 24,1; 28/12/2008 – 13,9; 29/12/2008 – 12,7; 30/12/2008 – 5,1				
Localidade	Alto Rio Cunha	Alto Rio Cunha	Baixo Rio Cunha	Baixo Rio Cunha	Baixo Rio Cunha
Classificação expedita do movimento ²	Complexo: translacional e fluxo de detritos	Complexo: rotacional e fluxo de detritos	Complexo: rotacional, translacional e fluxo de detritos	Complexo: rotacional, translacional e fluxo de detritos	Fluxo de detritos
Superfície de escorregamento ²	Solo – solo e Solo-rocha	Solo – solo	Solo – solo e Solo - rocha	Solo – solo e Solo - rocha	---
Danos	Comunidade isolada e plantação de pinus e plamito	Plantação de pinus	Interrompeu a estrada	Plantação de eucalipto	---

Notas: R1 e R2 representam as zonas de rupturas das cicatrizes. As informações de declividade e altimetria correspondem ao topo das cicatrizes e estão sujeitas ao erro intrínseco da escala do mapa

Fonte: (¹) Rocha (2011), (²) Adaptado de CEPED (2009)

Na Tabela 18 a classificação expedita dos movimentos segundo CEPED (2009) foi modificada, pois nos dados originais eram também classificados como fluxos de lama. Nas investigações em campo, porém, verificou-se a presença de materiais grosseiros nas áreas de transporte e acumulação, justificando a classificação dos movimentos como fluxos de detritos. O mesmo acontece com as superfícies de escorregamento das cicatrizes 1 e 2, onde foram identificadas em campo, superfícies do tipo solo-rocha.

Os fluxos de detritos estudados envolveram solos, blocos de rocha e troncos de árvores movimentados inicialmente na zona de ruptura por escorregamentos rotacionais e translacionais (Figura 53). Conforme a classificação de Guidicini e Nieble (1984) tratam-se de movimentos de massa do tipo complexo.

Os movimentos ocorreram em um período de precipitação anômala, onde tudo leva a crer que o excesso de água foi o principal responsável pelo aumento do peso da massa de solo, diminuição da resistência ao cisalhamento e desmonte hidráulico do solo pela saturação. Estes fatores favoreceram a ocorrência dos escorregamentos que, aliados à presença de encostas extensas e com altas declividades, resultaram em fluxos de detritos. Nos fluxos, os materiais mobilizados associaram-se à água adquirindo aspecto de um fluido (Figura 53).



(a) Encosta declivosa e extensa



(b) Aspecto do material mobilizado

Figura 53 – Características do fluxo de detritos da Cicatriz 4

Fonte: CEPED (2009)

As cicatrizes dos movimentos mapeados evidenciam a forma típica de um fluxo, sendo este composto pela área de desagregação do material (zona de ruptura), transporte e deposição. As figuras: Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57 e Figura 58 apresentam fotografias das cicatrizes mapeadas, onde estão representadas as formas adquiridas pelos fluxos de detritos presentes na bacia em estudo e a vegetação que os circunda.

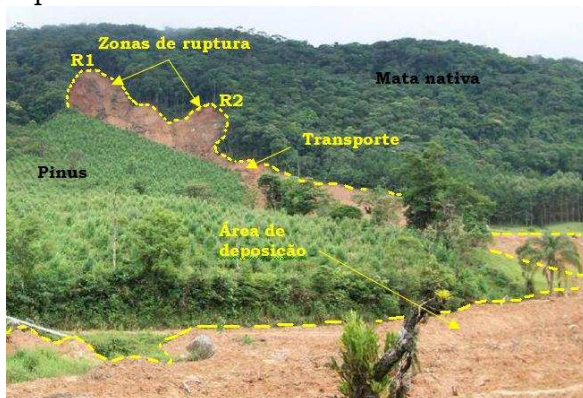
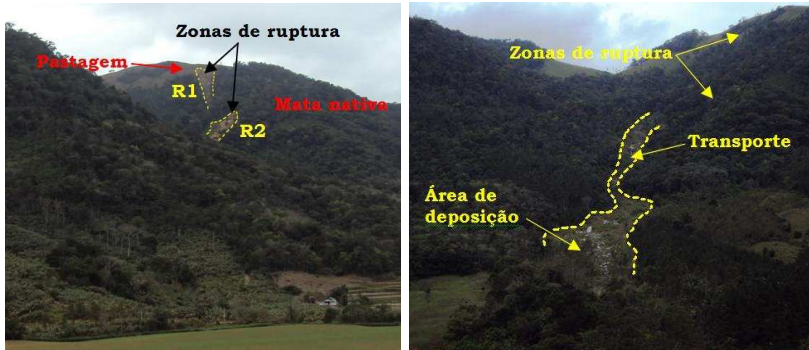


Figura 54 – Escorregamentos translacionais seguidos de fluxo de detritos de talude de corte na cicatriz 1



Figura 55 – Escorregamento rotacional seguidos de fluxo de detritos na cicatriz 2



(a) Zonas de ruptura

(b) Área de transporte e deposição

Figura 56 – Escorregamento rotacional e translacional seguido de fluxo de detritos na cicatriz 3



Figura 57 – Escorregamento rotacional e translacional seguido de fluxo de detritos na cicatriz 4



Figura 58 – Fluxo de detritos na cicatriz 5

Analisando a forma das cicatrizes 1, 3 e 4 nota-se a presença de duas zonas de ruptura, uma delas no alto da encosta (R1), mobilizando solos de origem residual e a outra em áreas de cota inferior (R2), envolvendo materiais residuais (cicatriz 1 e 3) e materiais provenientes de antigas movimentações, ou seja, de depósitos coluvionares (cicatriz 4). Desta forma, o material proveniente da ruptura superior agrega-se ao da inferior, aumentando a massa de material movimentado, bem como a sua velocidade e o raio de alcance.

Os escorregamentos que deram início aos fluxos ocorreram predominantemente em encostas com vegetação densa e nativa com declividades acima de 20° (classe de relevo forte e ondulado). As altas declividades contribuíram para o aumento da velocidade e alcance do material mobilizado, que percorreu em média 620m em um desnível de 260m. A Figura 59 apresenta os perfis topográficos das encostas onde ocorreram os escorregamentos, bem como a cota do topo da superfície de ruptura de cada cicatriz.

O banco de dados compõe ainda a caracterização geotécnica dos solos da cicatriz 3 e 4. Os resultados desta caracterização foram divididos em 2 grupos para a análise: Grupo 1 proveniente da superfície de ruptura R2 da cicatriz 3 e da superfície R1 da cicatriz 4, ou seja, um solo residual (Cambissolo de gnaiss granulítico); e Grupo 2, proveniente da superfície R2 da cicatriz 4, ou seja, um solo coluvionar.

A Tabela 19 apresenta os parâmetros físicos dos solos, obtidos através de ensaios de laboratório e a Tabela 20, a classificação das amostras segundo o método MCT, SUCS e AASHTO. A Figura 60 e a Figura 61 ilustram os gráficos de granulometria das 10 amostras analisadas.

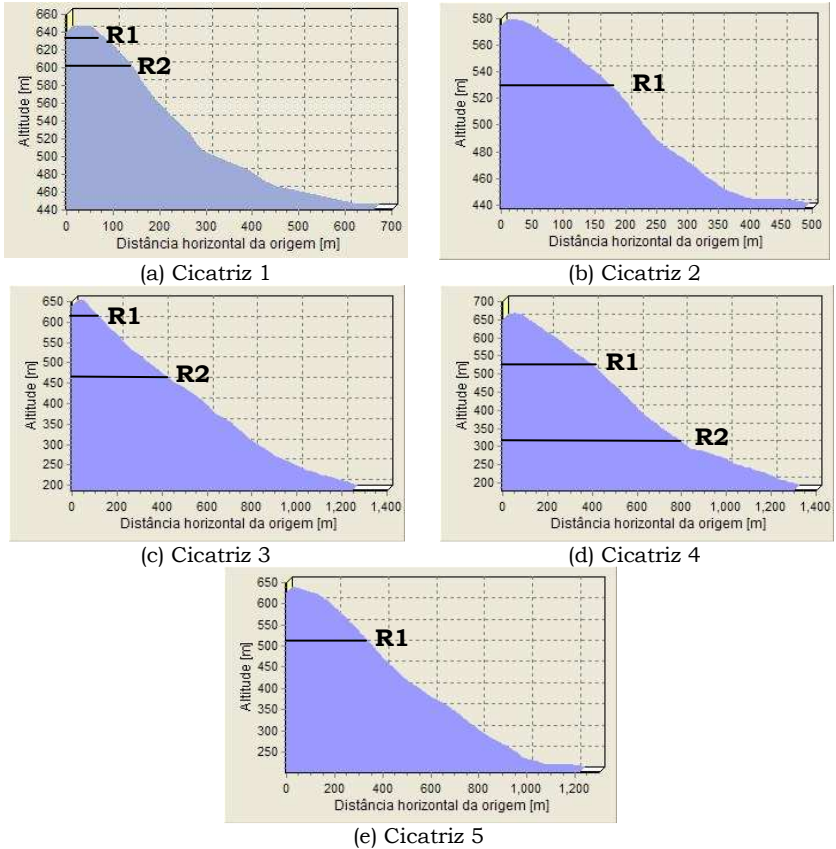


Figura 59 – Perfil topográfico da encosta

Na Figura 59 nota-se que apenas na cicatriz 4 uma das superfícies de ruptura (R2) ocorreu no terço inferior, estando associada à presença de um depósito de encosta. Nos demais casos as superfícies de ruptura ocorreram no topo, terço médio e meia encosta, envolvendo a mobilização de solos residuais.

Tabela 19 – Resumo dos ensaios de caracterização física do solo

Grupo	Locais de coleta		Amostra	Granulometria [%]					Massa específica δ [g·cm ⁻³]	Limites de consistência [%]		
	Cicatriz	Zona de ruptura		Argila	Silte	A.F.	A.M.	A.G.		LL	LP	IP
1	4	R1	1	39,7	26,8	12,3	13,1	6,7	2,72	71	56	15
		R1	2	0,5	23,5	26,4	26,6	18,8	2,76	40	NP	-
		R1	3	0,9	39,7	25,8	18,3	12,6	2,73	46	38	8
		R1	4	20,4	43,3	18,0	11,2	6,2	2,72	66	52	14
		R1	5	31,2	31,6	17,0	14,6	5,1	2,71	77	52	25
2	3	R2	10	6,5	31,5	27,2	20,9	11,5	2,69	48	44	4
		R2	6	5,7	41,5	18,9	20,6	12,2	2,68	42	29	13
		R2	7	4,6	31,8	17,4	19,2	21,1	2,65	40	30	10
		R2	8	22,4	37,3	22,0	9,7	7,0	2,76	68	41	27
		R2	9	42,0	24,1	8,2	11,9	10,2	2,73	74	42	32

Notas: A.F.: areia fina, A.M.: areia média, A.G.: areia grossa, δ : massa específica, LL: limite de liquidez, LP: limite de plasticidade e IP: índice de plasticidade

Tabela 20 – Classificação das amostras de solo (MCT, SUCS e AASHTO)

Grupo	Locais de coleta		Amostra	Classificação		Classificação
	Cicatriz	Zona de ruptura		MCT	SUCS	
1	4	R1	1	LG'	MH	A-7-5
		R1	2	NA/NS'	-	-
		R1	3	NS'-NA' ou NS'/NA'	SM	A-5
		R1	4	NG'	MH	A-7-5
		R1	5	NG'	MH	A-7-5
2	3	R2	10	NS'/NA'	SM	A-5
		R2	6	NS'/NA'	ML	A-7-6
		R2	7	NS'-NA'	SM	A-4
		R2	8	LG'	MH	A-7-5
		R2	9	LG'	MH	A-7-5

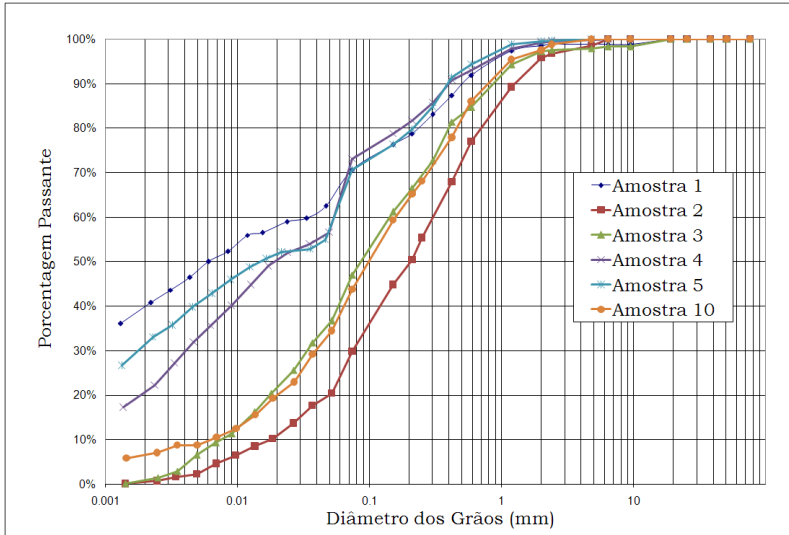


Figura 60 – Granulometria dos materiais do grupo 1

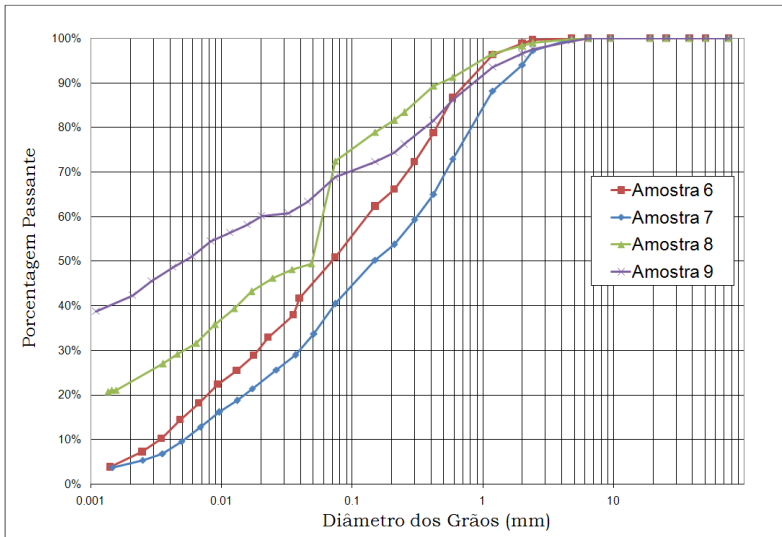


Figura 61 – Granulometria dos materiais do grupo 2

Segundo a classificação SUCS, em ambos os grupos de solo 50% das amostras apresentam granulação fina, com características siltosas de alta plasticidade (MH). A

amostra 2 não apresentou compatibilidade com nenhum dos grupos da metodologia SUCS, por ter sido classificada como não plástica, apesar de apresentar mais do que 12% de finos. Somente a amostra 6 foi classificada como silte de baixa plasticidade (ML), enquanto que as demais pertencem ao grupo de solos com granulação grossa, classificadas como areia siltosa (SM).

Observando os valores de IP, pela classificação de Burmister (1949, *apud* DAS, 2011), os solos classificados como SM apresentaram características de ligeiramente plástico (amostra 10) a baixa plasticidade (amostra 3 e 7) e aqueles do grupo MH de média plasticidade (amostra 1, 4 e 6) a alta (amostra 5, 8 e 9). Os solos residuais apresentaram elevada dispersão nos resultados de IP, variando de não plástico a altamente plástico. Por sua vez, os solos de colúvio caracterizaram-se pela média a alta plasticidade.

No sistema de classificação da AASHTO os solos residuais e coluvionares pertencem a grupos onde ocorrem principalmente materiais siltosos (A-7-5 e A-7-6) e argilosos (A-4 e A-5). Comparando esses grupos com aqueles do sistema SUCS percebe-se a relação entre o MH e o A-7-5, concordando com estudos de Liu (1967 *apud* DAS, 2011). Ainda segundo esse autor é pouco provável que os solos do grupo SM sejam classificados como A-5, o que ocorreu na amostra 3 e 10 de solo residual. Contudo, é possível que os solos do grupo SM sejam classificados como A-4 (amostra 7 do solo de colúvio) e que solos ML sejam classificados como A-7-6 (amostra 6 do solo de colúvio).

Na classificação MCT, a maioria (83%) das amostras de solos residuais do gnaisse granulítico apresentou comportamento não laterítico, com exceção da amostra 1 que foi caracterizada como argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas (LG'). Nessa classificação, Nogami e Villibor (1995) relacionam características dos solos às classes MCT, as quais, para as amostras em estudo encontram-se listadas no Anexo VI. Nota-se que foram

apresentadas somente as informações referentes aos solos nas condições naturais.

Embora a classificação MCT tenha sido desenvolvida para solos tropicais tradicionais, Nogami e Villibor (1995) estudaram a semelhança entre o seu comportamento com o dos solos transportados. Sendo assim, as amostras do grupo 2 foram submetidas aos ensaios desta metodologia, caracterizando solos com comportamento laterítico (50%) e não laterítico (50%). Com base nos resultados notou-se a disparidade entre os grupos de solos correlacionados, assim como no trabalho de Nogami e Villibor (1995).

Os valores de densidade real dos grãos de solos de origem residual e coluvionar encontram-se no intervalo de 26kN/m³a 27kN/m³. Estes valores, segundo Das (2011) aproximam-se daqueles característicos de minerais como o quartzo e o feldspato, identificados também na análise petrográfica.

Os parâmetros obtidos no ensaio de cisalhamento direto (peso específico natural, coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo) estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Parâmetros obtidos no ensaio de cisalhamento direto

Grupo	Cicatriz	Amostra	W _{nat} [%]	γ _{nat} [kN/m ³]	c' [kPa]	φ' [°]
1	4	1	42,4	16,91	15,2	29,1
		2	32,4	13,97	8,6	34,2
		3	34,9	14,74	4,7	30,3
		4	38,1	17,08	10,7	29,6
		5	41,3	16,53	14,0	33,4
	3	10	35,2	15,01	10,1	33,8
	Média		36,6	15,77	10,4	31,9
	Desvio Padrão		4,0	1,30	3,8	2,3
2	4	6	-	16,43	11,1	30,0
		7	32,5	16,32	12,2	27,2
		8	39,8	17,13	14,5	32,8
		9	35,0	17,54	17,6	31,7
	Média		35,8	16,78	13,4	30,4
Desvio Padrão		3,7	0,59	2,9	2,5	

Notas: W_{nat}:umidade natural, γ_{nat}:peso específico natural, c': coesão efetiva, φ':ângulo de atrito efetivo

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos do grupo 1 apresentaram valores semelhantes aos encontrados por Bernardes (2003) para um solo residual de ortognaisse (coesão variando entre 15,1kPa e 21,9kPa e ângulo de atrito entre 24,8° e 31,7°). Soares et al. (2001) para um solo residual de gnaisse encontrou valores de coesão entre 0 a 16,7kPa e 26,4° a 30,6° de ângulo de atrito. Maccarini (1980) em estudos sobre a influência da anisotropia nos parâmetros de resistência ao cisalhamento de um solo de gnaisse, identificou coesão de 46kPa a 60kPa e ângulo de atrito entre 31,4° a 33,0°.

As amostras do grupo 2, solos de colúvio, não apresentaram grandes variações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Fonseca et al. (2002) realizando ensaios em colúvios coletados sobre rochas granito-gnáissicas encontraram uma grande variação nos valores de coesão efetiva (6,8kPa a 31,7kPa) e pouca variação do ângulo de atrito. Soares e Politano (1997) identificaram uma grande variabilidade em resultados de ensaios de cisalhamento direto, em colúvio sobre rochas granito-gnáissicas. As maiores variações encontradas por esses autores ocorreram nos valores de coesão (10kPa a 98kPa).

De uma forma geral, os resultados dos parâmetros de resistência se assemelham em ambos os grupos de solos. Isso pode ser justificado pela presença de depósitos coluvionares antigos, formados por blocos de rochas em meio à massa de solo, em processo de intemperização (Figura 62).



Figura 62 – Depósito coluvionar em processo de intemperização (fotografia na zona de ruptura R2 da cicatriz 4)

O peso específico natural, que representa a média dos valores referentes a cada estágio do cisalhamento direto, não apresentou variação significativa entre as diferentes classes de solo.

5.3.6 Caracterização das unidades geotécnicas preliminares

Depois de definidas as unidades geotécnicas preliminares determinaram-se características de relevo, geotécnicas e de uso e ocupação do solo dos diferentes grupos mapeados, com base no conjunto de dados coletados e gerados. Essas características são relevantes na interpretação do comportamento dos solos presentes em cada unidade e na identificação dos locais onde os mesmos ocorrem.

Com base na distribuição das unidades, de acordo com as classes de declividade recomendadas pela EMBRAPA (1999) (Tabela 22) foi gerada a Tabela 23, onde as unidades geotécnicas são agrupadas de acordo com a origem do solo. Pôde-se perceber que a classe de relevo ondulado marca a transição entre os grupos de solo sedimentar e residual (Tabela 23).

Tabela 22 – Ocorrência das unidades geotécnicas preliminares em diferentes declividades

Declividade [%] ¹	Sedimentar	Residual		
	Asq [%]	PVLgn [%]	Ca [%]	Cgn [%]
0 – 3	23,6	0,8	0,4	0,5
3 – 8	51,6	3,3	1,4	3,0
8 – 20	22,5	8,1	3,4	9,3
20 - 45	2,3	7,2	2,7	32,7
45 -75	0,0	0,6	0,9	25,0
75 - 100	0,0	0,0	0,0	0,7
Total [%]	100	20	8,8	71,2

Fonte: (1) EMBRAPA (1999)

Tabela 23 – Ocorrência dos grupos de solo em diferentes declividades

Declividade [%] ¹	Classe de relevo	Sedimentar	Residual
		Asq [%]	PVLgn+Ca+Cgn [%]
0 – 3	Plano	23,6	1,7
3 – 8	Suave ondulado	51,6	7,7
8 – 20	Ondulado	22,5	20,8
20 - 45	Forte ondulado	2,3	42,6
45 -75	Montanhoso	0,0	26,5
75 - 100	Escarpado	0,0	0,7
Total	Total	100	100

Fonte: (1) EMBRAPA (1999)

Ao comparar o mapa geotécnico preliminar com o MDE notou-se que a unidade de solo sedimentar encontra-se nas áreas mais planas da bacia. Em contrapartida as unidades de solos residuais ocorrem nas regiões de maiores altitudes e declividades, constituindo áreas de declive, morros e montanhas. Uma descrição mais detalhada do relevo de cada unidade geotécnica é apresentada a seguir.

- Unidade Asq

Representa a unidade de solo sedimentar na área de estudos. Sua incidência está relacionada a áreas de relevo plano a ondulado, com predominância da classe suave ondulado. De acordo com o MDE encontra-se entre as altitudes: 120m e 179m (no exutório da bacia) e 435m e 460m.

Segundo IBGE (2003) a unidade geotécnica preliminar Asq é formada por “areias, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos, inconsolidados, depositados em planícies de inundação, terraços e calhas da rede fluvial atual”. Contudo, investigações em campo identificaram a presença de materiais com uma grande variação na textura e na coloração (Anexo V) em diferentes tipos de relevo.

Na classe de relevo ondulado foram identificados sedimentos predominantemente formados por materiais argilo arenosos com mica de coloração bruno-amarelado. Nas áreas de relevo suave ondulado e plano, nas imediações dos cursos d’água os sedimentos apresentaram textura areno siltosa e coloração que vai do bruno ao bruno claro, enquanto que no restante da área apresentaram materiais heterogêneos, sendo que, a fração argila juntamente com a cor bruno em diferentes tonalidades se sobressaíram.

Nos solos sedimentares notou-se a presença de materiais inconsolidados onde predomina a fração arenosa e siltosa, caracterizando de acordo com o IBGE (2003) sedimentos aluvionares. No entanto, a heterogeneidade dos solos, associada à grande quantidade de mica nas amostras e às tonalidades amareladas e avermelhadas, indicam a possibilidade de ocorrência de solos residuais do gnaiss granulítico transportados. Além disso, o histórico de ocorrência de movimentos de massa nas imediações desta unidade aumenta a possibilidade de deposição de solos oriundos destas movimentações. Assim, os solos pertencentes a referida unidade são caracterizados pela associação de sedimentos aluvionares e coluvionares.

A cor bruno foi identificada em 63% das amostras de solos sedimentares, apresentando-se em tonalidades claras e escuras (Anexo V). É importante ressaltar que apesar da tonalidade escura de determinadas amostras, não foi identificada matéria orgânica nas mesmas, contudo, elas representam solos desenvolvidos em más condições de drenagem. A presença de materiais úmidos e moles,

também caracterizou as más condições de drenagem dos solos sedimentares.

Investigações em campo identificaram o nível d'água variando entre 0,80m e 1,00m de profundidade, respectivamente em áreas de relevo suave ondulado e ondulado. Em áreas de relevo plano, nos locais de cultivo de arroz, o nível d'água encontra-se na superfície. Segundo o IBGE (2003), a presença desta cultura gera a possibilidade de uma gleização nas camadas superficiais do solo, o que não foi constatado nesta bacia. Destaca-se que na unidade Asq encontram-se como uso e ocupação do solo principalmente pastagem e cultivo de arroz irrigado.

A unidade geotécnica Asq ainda pode ser identificada por solos com baixa capacidade de suporte e alta compressibilidade, representando um obstáculo para possíveis implantações de obras de engenharia, contudo não é propensa à ocorrência de movimentos de massa.

- Unidade Ca

É importante salientar que devido a falta de acesso não foram realizadas investigações na unidade Ca, logo as informações referentes aos solos são na maioria provenientes de levantamentos realizados pelo IBGE (2003).

Na unidade Ca os solos são formados por Cambissolos derivados do arenito, com baixa expansividade devido à ausência de minerais expansivos na rocha de origem.

De uma forma geral, os Cambissolos compreendem solos de origem mineral, não hidromórficos, com cores avermelhadas e amareladas, indicando um solo de comportamento bem drenado. Apresentam o horizonte B incipiente (Bi), ou seja, pouco desenvolvido, onde os solos possuem textura argilosa a média argilosa. Normalmente são formados pelos horizontes A, Bi e C, onde ocorre pouca variação granulométrica, sendo que em alguns Cambissolos a distinção entre os horizontes é dificultada (IBGE, 2003).

Em relação ao relevo, observa-se no mapa geotécnico preliminar que a unidade Ca está presente em duas zonas distintas na bacia, caracterizadas pelas elevadas altitudes. Nestas zonas predominam relevos de ondulado a forte ondulado, bem como intervalos de altitude entre 736m a 876m. A unidade Ca apresenta a maior cota da bacia correspondente à 876m e amplitude de 110m a 140m. Como uso e ocupação do solo há quase que exclusivamente mata nativa.

Esta unidade não foi atingida por movimentos de massa. Além disso, não está sujeita a ocupação, uso e cultivo do solo, pois segundo o código florestal, 1/3 do topo superior de morros, montes, montanhas e serras são consideradas áreas de preservação permanente.

- Unidade PVLgn

Os solos da unidade PVLgn são identificados como Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico derivados do gnaiss granulítico, não são hidromórficos e segundo o IBGE (2003), normalmente apresentam os horizontes A, Bt e C, sendo o horizonte A do tipo moderado ou proeminente, com textura argilosa e muito argilosa. O horizonte B é do tipo textural e apresenta textura argilosa ou muito argilosa e relação silte/argila normalmente baixa (0,17 a 0,5). A argila neste horizonte possui alto grau de flocculação, contribuindo para a permeabilidade do material. As condições de drenagem podem ser verificadas através das cores do solo que são bruno forte ou vermelho-amarelada, o que indica boa drenagem.

Geralmente solos com B textural (Bt) apresentam este horizonte mais argiloso que os demais, principalmente em relação aos sobrejacentes, o que pode ser justificado devido a processos de iluviação, ou foi originário da rocha matriz ou ainda, por perda de argila do horizonte A através de erosão (EMBRAPA, 1999).

Os PVLa possuem sequência de horizontes A, B e C, relação silte/argila normalmente baixa, em torno de 0,17 a 0,5 e a argila com alto grau de flocculação. Em relação aos Podzólicos Vermelho-Amarelo (PV) os PVLa são mais

profundos, com menor diferenciação entre os horizontes e menor gradiente textural (IBGE, 2003).

Nas investigações em campo constatou-se a predominância de materiais silto argilosos, representando 67% das amostras analisadas (Anexo V). Deste percentual 50% apresentaram mica e 34% a cor amarelo avermelhado. Esta cor também foi identificada na maioria das amostras (47%) conforme Anexo V.

A granulação silto argilosa, bem como a cor amarela avermelhada, tende a caracterizar o solo do horizonte C de um gnaiss granulítico, onde os minerais instáveis (feldspatos, anfibólios e biotita), normalmente apresentam-se parcialmente alterados, originando, segundo Teixeira (1993), solos com granulometria silto areno argilosa, silto argilo arenosa amarelada a avermelhada e areno siltico arenosa amarelada. Segundo Teixeira (1993), Nogami e Villibor (1995) a presença de mica (biotita) caracteriza solos de alteração expansivos.

Em geral, nessa unidade, o uso e ocupação do solo é de pastagem. Em altitudes que variam de 130m a 206m e 360m a 503m encontram-se as principais estradas vicinais de acesso às comunidades locais (Alto do Rio Cunha e Baixo do Rio Cunha). Nas margens dessas vias, especialmente nas cotas de 360m a 503m, onde predomina o relevo ondulado, está concentrada a maior parte das residências. Nas áreas com altitude de 130m a 206m predomina o relevo forte ondulado e nas áreas com altitude de 719m a 742m relevo ondulado.

Movimentos induzidos do tipo rotacional ocorreram nessa unidade, em local de relevo ondulado com cultivo de bananas e presença de taludes de corte para a locação do sistema viário. Observações em campo identificaram a conservação indevida e a inexistência de sistema de drenagem nas estradas, o que pode gerar pontos de instabilidade. Em áreas de pastagem foi identificada a presença de rastejos onde o relevo é ondulado, forte ondulado e montanhoso. Assim, a suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa está ligada especialmente ao uso e ocupação do solo inadequado.

- Unidade Cgn

A unidade Cambissolo de gnaiss granulítico possui a maior variação altimétrica da bacia, apresentando cotas de 197m a 740m, onde predominam os intervalos de 500m a 600m (26%) e de 600m a 700m (30%). O relevo predominante é o forte ondulado (Tabela 24), enquanto que o uso e ocupação do solo é composto principalmente por mata nativa.

Tabela 24 – Classes de relevo na unidade Cgn

Declividade [%] ¹	Classe de relevo ¹	Cgn [%]
0 – 3	Plano	1
3 – 8	Suave ondulado	4
8 – 20	Ondulado	13
20 – 45	Forte ondulado	46
45 -75	Montanhoso	35
75 – 100	Escarpado	1
Total [%]		100

Fonte: (1) EMBRAPA (1999)

Esta unidade envolveu a maioria dos movimentos de massa induzidos e todos aqueles de origem natural, condicionados principalmente pelo relevo forte ondulado e montanhoso (Tabela 25). Os movimentos naturais ocorreram onde o uso do solo (nos locais de ruptura) apresentou predominância de mata nativa, no entanto, sua incidência afetou residências e áreas de cultivo, causando danos aos moradores.

Tabela 25 – Movimentos de massa na unidade Cgn

Grupo	Classe de relevo ¹	Tipo do movimento de massa	Número de ocorrência
Induzido	Ondulado	---	2
Natural		Complexo (translacional + fluxo de detritos)	1
Natural		Complexo (rotacional+fluxo de detritos)	1
Natural	Forte ondulado	Complexo (translacional + rotacional+fluxo de detritos)	1
Induzido		Complexo (translacional + rotacional+fluxo de detritos)	1
Induzido		Complexo (rotacional+fluxo de detritos)	1
Induzido		---	13
Induzido	Montanhoso	Rotacional	2
Induzido		Translacional	1
Induzido		Rotacional	3
Natural		Complexo (translacional + fluxo de detritos)	1
Natural		Complexo (translacional +rotacional+fluxo de detritos)	1
Induzido		Complexo (translacional +rotacional+fluxo de detritos)	1
Natural		Complexo	1
Induzido		---	6
Induzido	Escarpado	Translacional	2
Natural		Complexo	1

Fonte: ⁽¹⁾ EMBRAPA (1999)

Pedologicamente a unidade Cgn é formada por Cambissolos, assim como na unidade Ca, onde o horizonte

B é incipiente e a estabilidade das encostas é condicionada principalmente pelo horizonte subjacente. Sendo assim, os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos nessa unidade correspondem ao horizonte C, onde as propriedades mecânicas do solo são influenciadas pelo tipo, textura e estrutura da rocha de origem, bem como pelos minerais que a compõe.

Desta forma, é relevante identificar os minerais existentes no substrato rochoso, o qual neste estudo, após análise petrográfica apresentou estrutura formada por bandejamento gnáissico e constituição mineralógica composta por: quartzo, feldspato e biotita. A presença de minerais escuros, como é o caso da biotita, indica uma menor resistência ao intemperismo e ainda por pertencer ao grupo das micas, como mencionado anteriormente, agrega aos solos características expansivas.

Com base nos ensaios de cisalhamento direto, os solos residuais do gnaiss granulítico apresentaram em média coesão de 11kPa e ângulo de atrito de 32° (Tabela 21). Além desses parâmetros, outras características geotécnicas destes solos estão ilustradas na Tabela 26, determinadas em 6 amostras do horizonte C.

Tabela 26 – Características geotécnicas do Cambissolo de gnaiss granulítico da área de estudo (horizonte C)

Parâmetros	Características geotécnicas
SUCS	Silte argiloso com areia (50%), areia siltosa (33%)
MCT	Não laterítico (83%), Laterítico (17%)
AASHTO	A-7-5 (50%), A-5 (33%)
IP [%]	4-25
δ [g·cm ⁻³]	2,69-2,76
W_{nat} [%]	32,4-42,4
γ_{nat} [kN/m ³]	15,01-17,08
c' [kPa]	4,7-15,2
ϕ' [°]	29,1-34,2

Notas: W_{nat} :umidade natural, δ :massa específica, γ_{nat} :peso específico natural, c' : coesão efetiva, ϕ' :ângulo de atrito efetivo

Na metodologia AASHTO, os solos são classificados com o intuito de avaliar a sua qualidade como material de subleito para rodovias, nesta unidade eles foram caracterizados como mediano a ruim.

Não foram realizados ensaios nos demais horizontes do perfil de alteração do gnaiss granulítico, no entanto, segundo Teixeira (1993) os solos do horizonte B são descritos como argilo siltoso e argilo argiloso. Além disso, no levantamento realizado pelo IBGE (2003), uma amostra de solo coletada em terreno montanhoso foi caracterizada, gerando dados relacionados aos horizontes A e B da unidade em questão (Tabela 27).

Tabela 27 – Características do horizonte A e B do solo de alteração de um gnaiss granulítico

Horizonte	Profundidade [m]	Textura	Cor
A	0-0,10	Franco argilosa	Bruno a bruno-escuro (10YR 4/3)
B	0,10-0,75	Argilosa	Bruno-forte 7,5 YR 5/6

Fonte: IBGE (2003)

Notas: δ : massa específica, γ_{nat} : peso específico natural, c' : coesão efetiva, ϕ' : ângulo de atrito efetivo

A unidade Cgn refere-se aos solos residuais, porém a ocorrência de depósitos de encostas (colúvios) ao longo da sua área foi identificada em campo. Este tipo de solo é classificado como de origem sedimentar, porém, nesse estudo, por apresentar características geotécnicas semelhantes as dos solos residuais (Tabela 28), foi agregado a este grupo.

Contudo, sugere-se a delimitação das áreas referentes aos depósitos de encostas identificadas de forma preliminar em campo, e um maior detalhamento do seu comportamento geotécnico.

Tabela 28 – Características geotécnicas de solos de colúvio na unidade Cgn

Parâmetros	Características geotécnicas
SUCS	Silte argiloso com areia (50%), areia siltosa (25%), silte arenoso (25%)
MCT	Não laterítico (50%), Laterítico (50%)
AASHTO	A-7-5 (50%), A-7-6 (25%), A-4 (25%)
IP [%]	10-32
δ [g·cm ⁻³]	2,65-2,76
W_{nat} [%]	32,5-39,8
γ_{nat} [kN/m ³]	1,66-1,75
c' [kPa]	11-18
ϕ' [°]	27-32

Notas: δ : massa específica, W_{nat} : umidade natural, γ_{nat} : peso específico natural, c' : coesão efetiva, ϕ' : ângulo de atrito efetivo

5.4 Modelagem dos escorregamentos com SHALSTAB

Conforme apresentado no mapeamento geotécnico, a ocorrência dos fluxos de detritos na bacia do Rio Cunha está relacionada especialmente aos escorregamentos translacionais em solos residuais do gnaiss granulítico.

Nessa bacia, para o cálculo do grau de suscetibilidade a escorregamentos translacionais com o modelo SHALSTAB, foram utilizados os mapas de declividade (Figura 36) e o de área de contribuição (Figura 63).

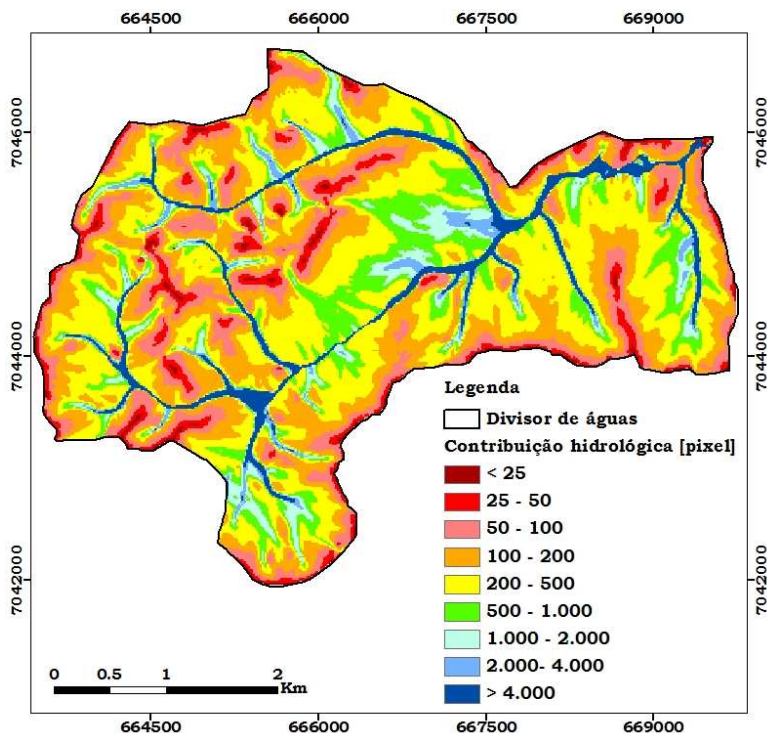


Figura 63 – Mapa de área de contribuição empregado na modelagem com SHALSTAB

Na Figura 63 é possível observar que as áreas de concentração do fluxo localizam-se na base das encostas, onde, normalmente, o relevo apresenta uma forma côncava, sugerindo a presença de canais de drenagem. Também ficou evidenciado que os locais com a maior área de contribuição correspondem ao canal principal da bacia e seus afluentes.

Além dos referidos mapas, foram utilizados no cálculo de instabilidade os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos de origem residual e a sua densidade, apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Parâmetros do solo residual de gnaisses granulíticos empregados na modelagem com o SHASTAB

Grupo do solo	Cicatriz	Amostra	ρ_s [kg/m ³]	c' [N/m ²]	ϕ' [°]
Residual	4	1	1724	15208	29,1
		2	1425	8600	34,2
		3	1503	4749	30,3
		4	1742	10712	29,6
		5	1685	14020	33,4
	3	6	1531	10080	33,8

A profundidade do solo também foi considerada como parâmetro de entrada no modelo e foi estimada com base na metodologia descrita no item 4.2.4.4. Observa-se que, nos levantamentos da profundidade do solo, a tradução manual não encontrou substrato rochoso aos 15m. Kobiyama et al. (2010) nesta bacia identificaram a profundidade de 15m e Michel (2011) encontrou 10m no topo de um dos escorregamentos (cicatriz 4). Logo, para as simulações com o modelo foram adotados valores variando entre 5m e 20m.

Considerando todos esses dados foram realizadas 48 simulações (Tabela 30) para identificar o conjunto das variáveis que melhor representa o fenômeno na área em estudo. Notou-se que nas profundidades de 10m e 15m foi encontrada uma melhor concordância entre os escorregamentos mapeados e as classes de estabilidade, logo dentro desse intervalo variou-se a profundidade do solo a cada 1m.

O modelo é considerado satisfatório quando a maioria dos escorregamentos ocorrerem nas categorias de menores valores de $Q \cdot T^{-1}$ (classes mais instáveis) e quando os escorregamentos apresentarem valores de $Q \cdot T^{-1}$ significativamente diferentes dos cálculos aleatórios. Com base nessas premissas foram escolhidas dentre as simulações apresentadas no Anexo VII a simulação 19 (Tabela 31 e Figura 64) e a simulação 21 (Tabela 32 e Figura 65).

Os resultados dessas simulações apresentam a área da bacia distribuída nas classes de estabilidade e a

distribuição dos escorregamentos mapeados e aleatórios nas mesmas.

Tabela 30 – Descrição das simulações

Simulação	Profundidade do solo [m]	Parâmetro dos solos residuais
01	5	Amostra 1
02		Amostra 2
03		Amostra 3
04		Amostra 4
05		Amostra 5
06		Amostra 6
07	10	Amostra 1
08		Amostra 2
09		Amostra 3
10		Amostra 4
11		Amostra 5
12		Amostra 6
13	11	Amostra 1
14		Amostra 2
15		Amostra 3
16		Amostra 4
17		Amostra 5
18		Amostra 6
19	12	Amostra 1
20		Amostra 2
21		Amostra 3
22		Amostra 4
23		Amostra 5
24		Amostra 6
25	13	Amostra 1
26		Amostra 2
27		Amostra 3
28		Amostra 4
29		Amostra 5
30		Amostra 6
31	14	Amostra 1
32		Amostra 2
33		Amostra 3
34		Amostra 4
35		Amostra 5
36		Amostra 6
37	15	Amostra 1
38		Amostra 2
39		Amostra 3

40		Amostra 4
41		Amostra 5
42		Amostra 6
43		Amostra 1
44		Amostra 2
45	20	Amostra 3
46		Amostra 4
47		Amostra 5
48		Amostra 6

Tabela 31 – Distribuição da área da bacia do Rio Cunha nas classes de estabilidade do SHALSTAB.
Resultado da simulação 19

Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	3,5	3,5	0,6	0,6	2	33,3	33,3
log Q/T < -3,1	20,1	23,6	3,2	3,8	3	50,0	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,8	35,4	1,9	5,7	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,4	43,8	1,4	7,1	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,2	47,0	0,5	7,6	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	47,4	0,1	7,7	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	52,6	100,0	8,5	16,2	0	0,0	100,0

Tabela 32 – Distribuição da área da bacia do Rio Cunha nas classes de estabilidade do SHALSTAB.
Resultado da simulação 21

Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	6,5	6,5	1,1	1,1	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	31,5	38,0	5,1	6,2	3	50,0	100,0
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,0	51,0	2,1	8,3	0	0,0	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,9	59,8	1,4	9,7	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	2,8	62,6	0,5	10,2	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,3	62,9	0,0	10,2	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	37,1	100,0	6,0	16,2	0	0,0	100,0

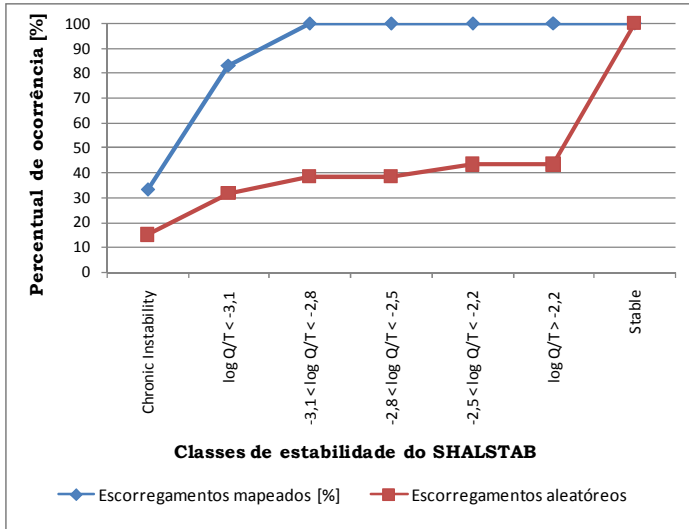


Figura 64 – Comparação entre os escorregamentos mapeados e os escorregamentos aleatórios na simulação 19

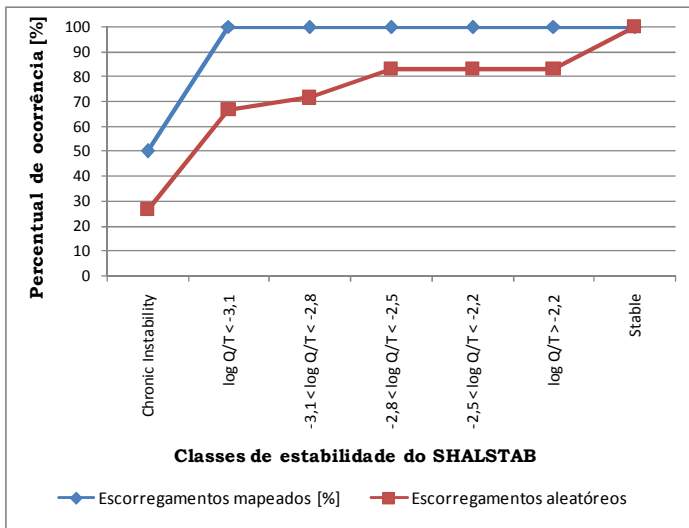


Figura 65 – Comparação entre os escorregamentos mapeados e os escorregamentos aleatórios na simulação 21

Na simulação 19, em 23,6% da área, 83,3% dos escorregamentos foram identificados nas duas classes mais instáveis do modelo. O restante dos escorregamentos

(16,7%) foi identificado na classe de $\log Q \cdot T^{-1}$ entre -3,1 e -2,8. Sendo assim, nessa simulação 100% dos escorregamentos mapeados correspondem a 35,4% da área total da bacia. Em contrapartida na simulação 21, 100% dos escorregamentos encontram-se nas duas classes mais instáveis, no entanto, englobam uma área maior de instabilidade (38,0%) quando comparado a simulação 19.

Evidencia-se que, através da comparação entre os parâmetros dos solos empregados nestas duas simulações, a profundidade do solo é a mesma e a coesão apresentou maior variação quando relacionada ao ângulo de atrito e a densidade. Na amostra 01, empregada na simulação 19 onde o percentual de áreas instáveis é menor, o valor da coesão é maior, coerente com a sua influência na análise de estabilidade de uma encosta.

Observando a Figura 64 e a Figura 65 é notável que a disparidade entre os escorregamentos mapeados e os escorregamentos aleatórios é maior na simulação 19. Logo, adotou-se essa simulação para a elaboração do mapa suscetibilidade da bacia do Rio Cunha, classificado em função das sete classes de estabilidade definidas pelo SHALSTAB (Figura 66). Neste mapa foram sobrepostas as cicatrizes dos escorregamentos, utilizadas na verificação dos resultados da modelagem.

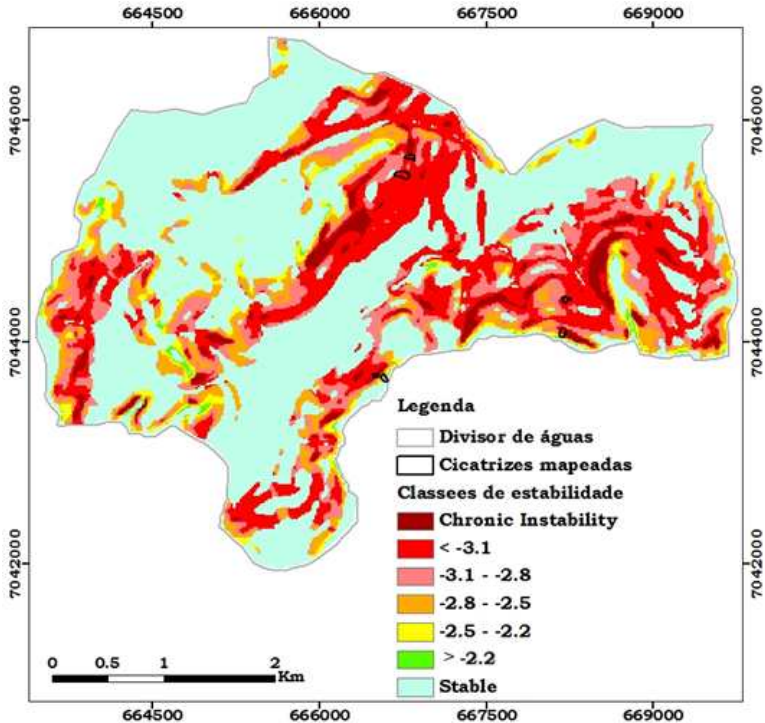


Figura 66 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais da simulação 19

A distribuição das classes de estabilidade geradas no mapa da Figura 66 encontra-se na Figura 67.

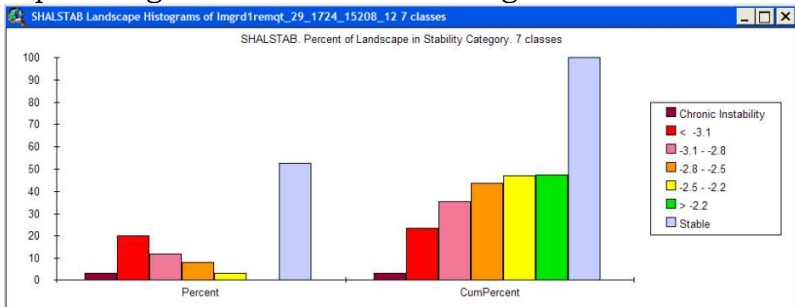


Figura 67 – Distribuição das classes de estabilidade na área

Verifica-se que 56,3% da bacia foi classificada como estável (classes: *Stable*; $\log Q \cdot T^{-1}$ maior que -2,2 e $\log Q \cdot T^{-1}$

entre -2,5 e -2,2). Desse percentual, 52,6% corresponde a classe incondicionalmente estável e saturada (*Stable*). Isso implica que, mesmo o regolito em condições de saturação, não há a ocorrência de movimentos de massa do tipo translacional. Das demais classes analisadas a de maior ocorrência (20,1%) é a incondicionalmente instável e não saturado ($\log Q \cdot T^{-1}$ menor que -3,1).

A partir da distribuição dos escorregamentos nas classes de estabilidade (Figura 68) é possível observar que as cicatrizes dos escorregamentos apresentam as zonas de rupturas em áreas classificadas como instáveis pelo SHALSTAB (classes: $\log Q \cdot T^{-1}$ entre -2,8 e -2,5; $\log Q \cdot T^{-1}$ entre -3,1 e -2,8; $\log Q \cdot T^{-1}$ menor que -3,1 e *Chronic Instability*), sendo que, 50% pertence à classe incondicionalmente instável e não saturado ($\log Q \cdot T^{-1}$ menor que -3,1). Isto mostra que o modelo apresentou um bom ajuste em relação aos dados observados no campo.

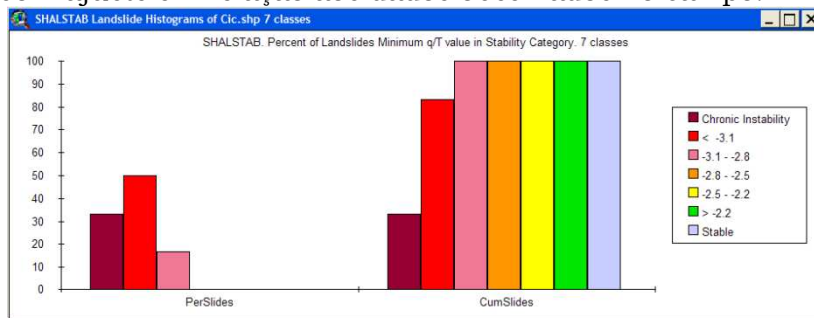


Figura 68 – Distribuição dos escorregamentos nas classes de estabilidade

Dentre as cicatrizes mapeadas, duas ocorreram na classe de maior instabilidade (*Chronic Instability*), em locais com declividades acima de 35°. Guimarães (2000) identificou para essa classe a ocorrência de paredões rochosos e a presença de declividades próximas a vertical (locais próximos aos divisores de água). Contudo, na bacia do Rio Cunha não foi identificada a presença de paredões rochosos. Salienta-se que não foram investigadas todas as áreas de ocorrência dessa classe, devido à dimensão da bacia e a dificuldade de acesso, fazendo-se necessário um número maior de investigações.

Observa-se no gráfico da Figura 69, que os escorregamentos encontram-se a partir de valores de \log de $Q \cdot T^{-1}$ menores do que -2,8 (classes: $\log Q \cdot T^{-1}$ entre -3,1 e -2,8; $\log Q \cdot T^{-1}$ menor que -3,1 e *Chronic Instability*), indicando o limiar entre as classes instáveis e estáveis na bacia.

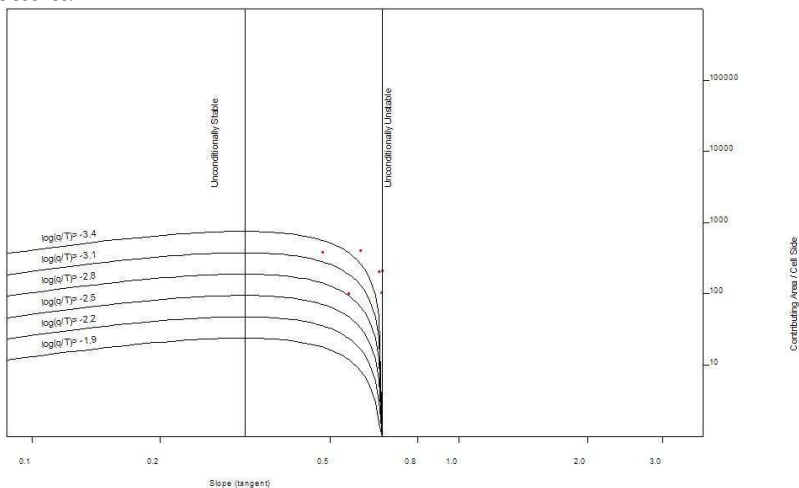


Figura 69 – Distribuição dos escorregamentos na declividade *versus* área de contribuição

Na ocorrência de um maior número de dados (escorregamentos), a identificação do limiar entre as classes instáveis e estáveis tem maior precisão, podendo gerar classes conforme a situação apresentada pela bacia. No presente trabalho, foram adotadas as classes instáveis por Dietrich e Montgomery (1998), individualizadas com base em um grande número de escorregamentos. Entretanto, na área de estudo não foram identificados escorregamentos na classe instável e não saturado ($\log Q \cdot T^{-1}$ entre -2,8 e -2,5).

Comparando o mapa de suscetibilidade (Figura 66) com o inventário dos movimentos de massa (Figura 45), conforme apresentado na Figura 70, identificou-se que a modelagem com o SHALSTAB, apesar de ser propícia à identificação de escorregamentos do tipo translacional, previu todos os escorregamentos translacionais (seguidos ou não de fluxo de detritos), certos escorregamentos

rotacionais (seguidos ou não de fluxo de detritos) e o escorregamento do tipo complexo (misto de rotacional e translacional). Isto se deve ao fato de que estes movimentos encontram-se em declividades acentuadas (especialmente entre 25° e 33°).

As ocorrências classificadas como rastejo e escorregamentos rotacionais, caracterizadas por declividades entre 6° e 17°, foram mapeadas na classe estável.

Os escorregamentos identificados no mapa de inventário somente como induzidos, não foram classificados quanto ao tipo e encontram-se em áreas estáveis e instáveis, com predominância nas áreas instáveis.

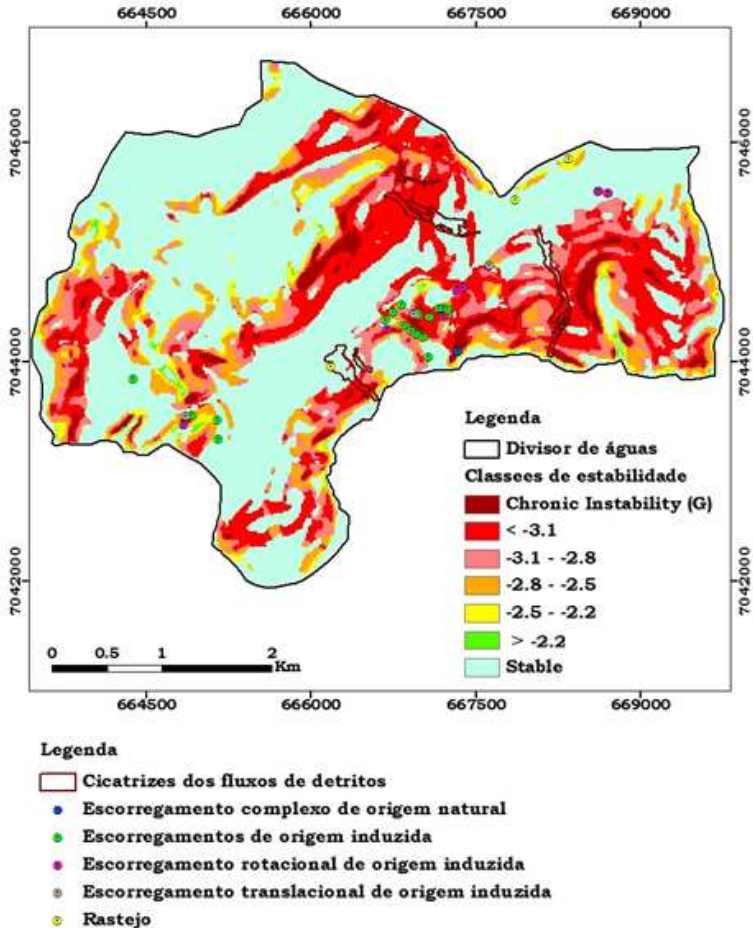


Figura 70 – Localização dos movimentos de massa no mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais

Pode-se também verificar que, em relação às cicatrizes dos fluxos de detritos, a maioria foi definida no modelo como instável desde o início da cicatriz (zona de ruptura), até a área de transporte. Esperava-se que a porção superior do escorregamento apresentasse classe de maior instabilidade, pois o SHALSTAB identifica o local da ruptura. Além disso, o modelo classificou como áreas instáveis locais onde não ocorreram escorregamentos no período de intensa pluviometria. Nestes locais a

caracterização de fatores ambientais é de grande relevância para identificar condições propícias à ocorrência destes fenômenos.

Assim, para melhorar o desempenho da modelagem, faz-se necessário o refinamento dos dados de entrada, uma vez que nesse trabalho a escala do mapa de suscetibilidade é usualmente empregada em mapeamentos preliminares. A variabilidade dos parâmetros de solo no meio físico também pode influenciar na identificação das áreas instáveis, porém, foram considerados constantes para toda a área na modelagem com o SHALSTAB.

5.5 Comparação entre os mapas de suscetibilidade e os mapas temáticos

Objetivando a caracterização das áreas classificadas como instáveis no mapa de suscetibilidade (Figura 66), realizou-se a sua comparação com os seguintes mapas temáticos: MDE (Figura 35), mapa de declividade (Figura 36), mapa de uso e ocupação do solo (Figura 37) e mapa de unidades geotécnicas preliminares (Figura 44). Estas comparações encontram-se respectivamente apresentadas na Figura 71, Figura 72, Figura 73, Figura 74 e Figura 75.

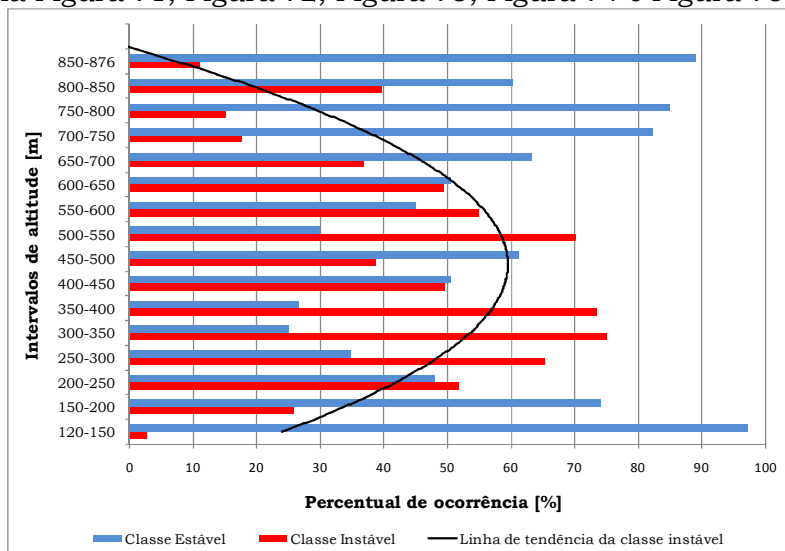


Figura 71 – Distribuição da altitude nas classes instáveis e estáveis

Com base na distribuição da altitude é possível observar a ocorrência das classes instáveis ao longo de todos os intervalos, com predomínio das classes instáveis nas altitudes entre 250m a 400m e 550m a 600m. Conforme o banco de dados dos escorregamentos (Tabela 18), estes ocorreram predominantemente em altitudes que variam entre 450m a 650m.

A ocorrência de áreas instáveis em todos os intervalos apresentados demonstra que a altitude, nesse estudo, não representa um fator condicionante na deflagração dos escorregamentos. A análise dos dados demonstra coerência entre a modelagem e a ocorrência dos escorregamentos observados em campo.

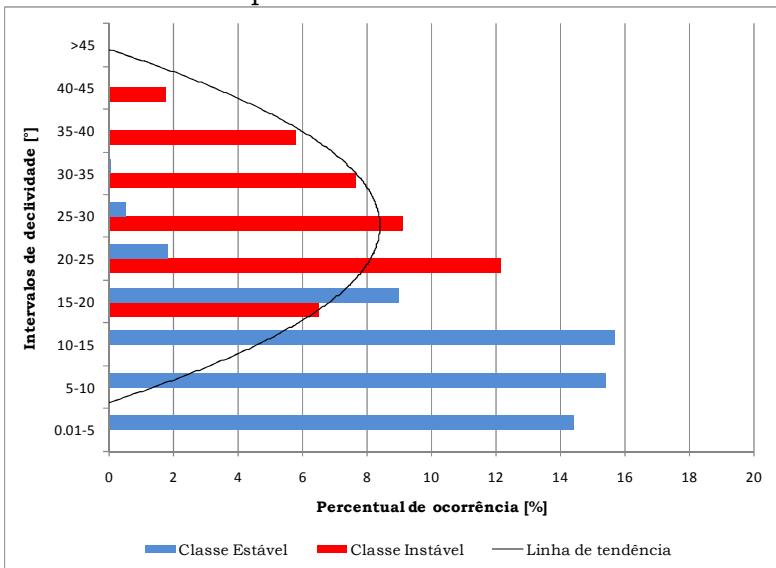


Figura 72 – Distribuição da declividade nas classes instáveis e estáveis

O relevo nas áreas instáveis é mais declivoso em relação às estáveis, apresentando declives entre 15° a 45°, sendo que a maior concentração de áreas instáveis ocorreu entre 20° e 25°, decaindo gradativamente conforme o aumento da declividade, até o limite de 45°.

Ao contrário da altitude, a declividade do terreno é um dos fatores determinantes na ocorrência de áreas

instáveis, comprovando a influência do controle topográfico (declividade) nos resultados gerados pelo SHALSTAB. Na área de estudos os escorregamentos translacionais ocorreram em declividades entre 15° a 35°, sendo mais evidenciados entre 20° e 25°, em concordância com a modelagem.

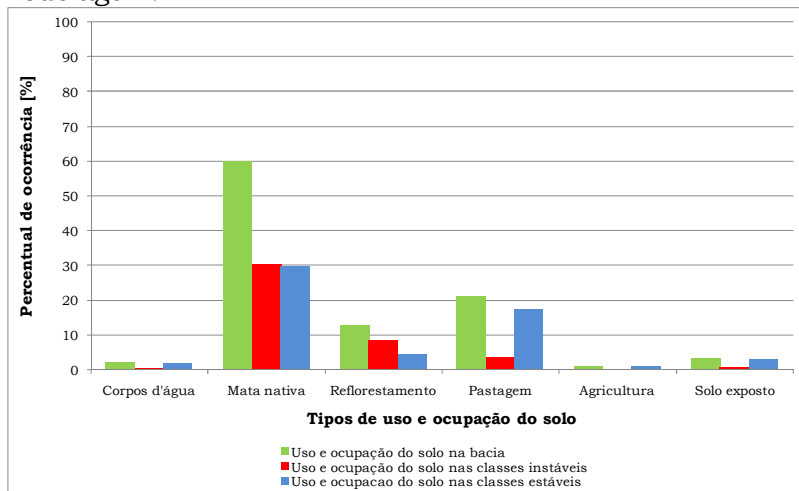


Figura 73 – Distribuição do uso e ocupação do solo nas classes instáveis e estáveis

Em relação ao uso e ocupação do solo, na área coberta por mata nativa (60% da bacia), ocorreu praticamente o mesmo percentual de áreas instáveis e estáveis. Nas áreas de reflorestamento (13% da bacia), houve o predomínio de classes instáveis com 8,2%. Para as áreas de pastagens ocorreu a predominância das áreas estáveis com 17,5% do total de 21,1%. Nos demais usos, agricultura, solo exposto e corpos d'água, a quantidade de áreas instáveis não é significativa.

A distribuição dos diferentes usos e ocupação do solo nas áreas classificadas com instáveis encontra-se na Figura 74.

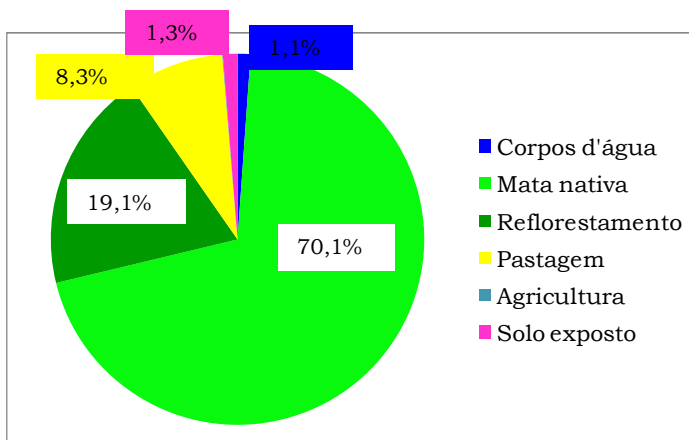


Figura 74 – Distribuição do uso do solo nas áreas instáveis

Nota-se a predominância de áreas instáveis nos locais de floresta nativa primária, em concordância com as observações realizadas em campo, onde ficou evidenciado que a maioria dos escorregamentos translacionais teve início neste uso. Adicionalmente, em campo também foram evidenciados escorregamentos em áreas de reflorestamento de pinus e pastagem, reforçando a correspondência da modelagem com a situação real da bacia em estudo.

Nos locais de mata nativa a ocorrência dos escorregamentos é considerada de origem natural. O mecanismo de instabilização, neste caso, não teve influência antrópica, estando condicionado a outros fatores, dentre os quais destacam-se a declividade da encosta, área de contribuição da bacia, condições geológico-geotécnicas e a pluviometria.

Neste mapeamento, associa-se a predominância de mata nativa nas áreas de instabilidade, sobretudo devido a declividade em que se encontram, predominantemente entre 20° e 30°. Por sua vez, as áreas estáveis em mata nativa encontram-se especialmente entre 0° e 20°. Nas áreas instáveis, onde o uso do solo é de reflorestamento e pastagem, ocorre predominantemente o intervalo de declividade de 20° a 25°. É notório que em locais mais íngremes, onde o relevo é mais suscetível a ocorrência de movimentos de massa e a processos de degradação ambiental, a dificuldade do cultivo do solo propicia a

conservação da vegetação e o seu desenvolvimento, no entanto, observou-se em algumas áreas, que esta condição do relevo não impossibilitou o cultivo do solo.

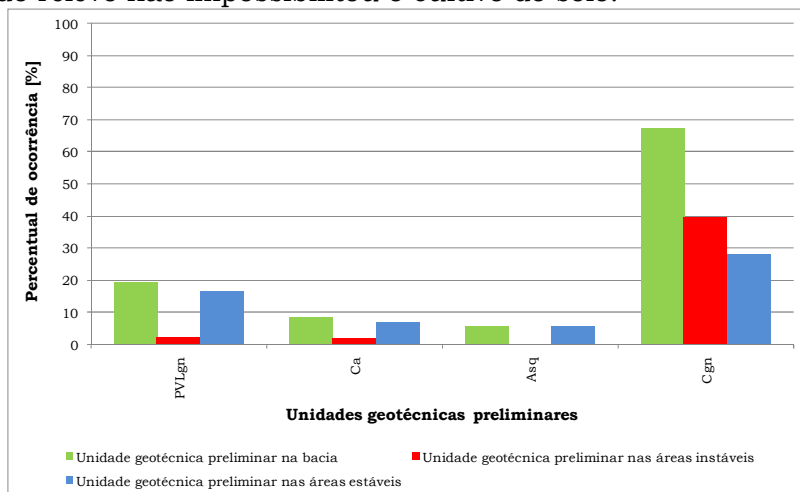


Figura 75 – Distribuição das unidades geotécnicas preliminares nas classes instáveis e estáveis

A comparação entre as unidades geotécnicas preliminares e as classes de estabilidade evidenciou a ocorrência de áreas instáveis nas unidades de solos residuais do gnaiss e do arenito. Na unidade de solo sedimentar caracterizada por áreas planas, o modelo SHALSTAB não previu a ocorrência de escorregamentos.

A distribuição das unidades geotécnicas preliminares nas classes instáveis encontra-se na Figura 76.

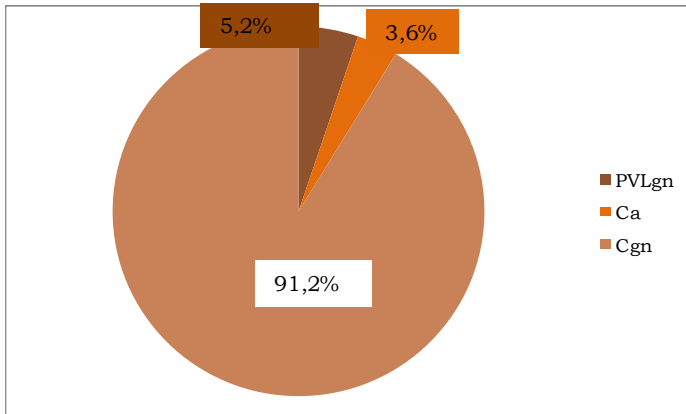


Figura 76 – Distribuição das unidades geotécnicas preliminares nas áreas instáveis

Ficou evidenciado que na unidade Cambissolo de gnaiss granulítico, ocorre a maioria das áreas instáveis. Esta unidade, conforme apresentado no item 5.3.4, foi classificada como a mais atingida pelos movimentos de massa na bacia, abrangendo todos os escorregamentos translacionais.

Desta forma, as simulações com o modelo SHALSTAB identificaram as áreas de instabilidade com características ambientais similares às encontradas em campo.

5.6 Avaliação dos parâmetros do solo na instabilidade

Nas simulações realizadas, notou-se a influência dos parâmetros dos solos no condicionamento dos escorregamentos (aumento ou diminuição do percentual de áreas instáveis e estáveis), como pode ser observado nas figuras abaixo (Figura 77, Figura 78, Figura 79, Figura 80, Figura 81, Figura 82, Figura 83 e Figura 84).

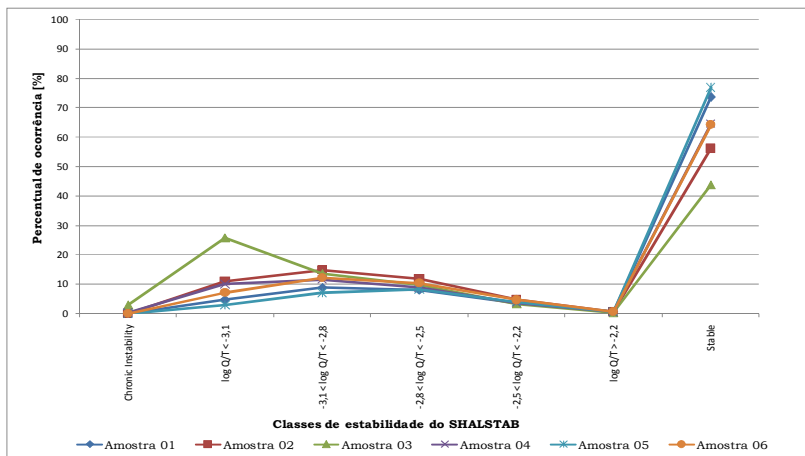


Figura 77 – Variação da estabilidade na profundidade de 5 m

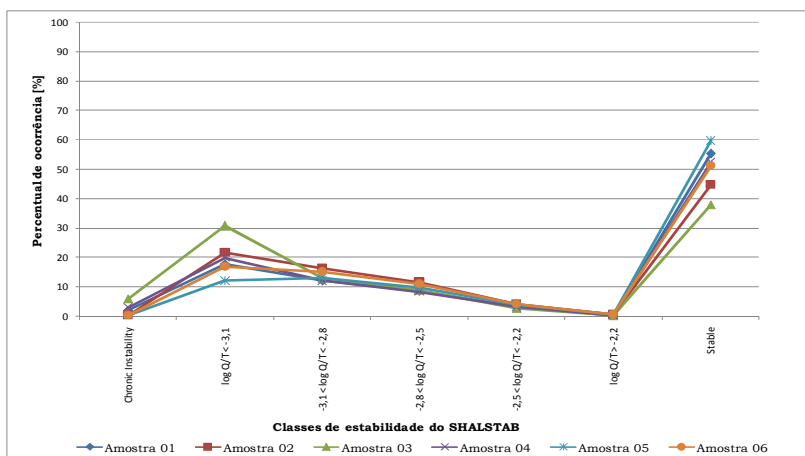


Figura 78 – Variação da estabilidade na profundidade de 10 m

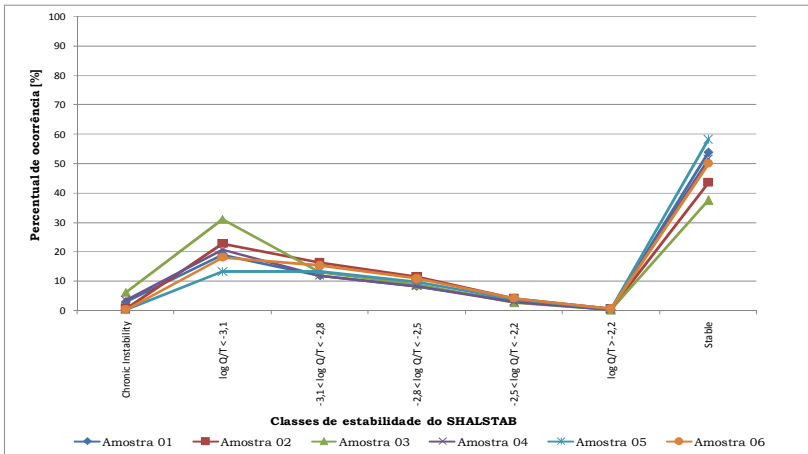


Figura 79 – Variação da estabilidade na profundidade de 11 m

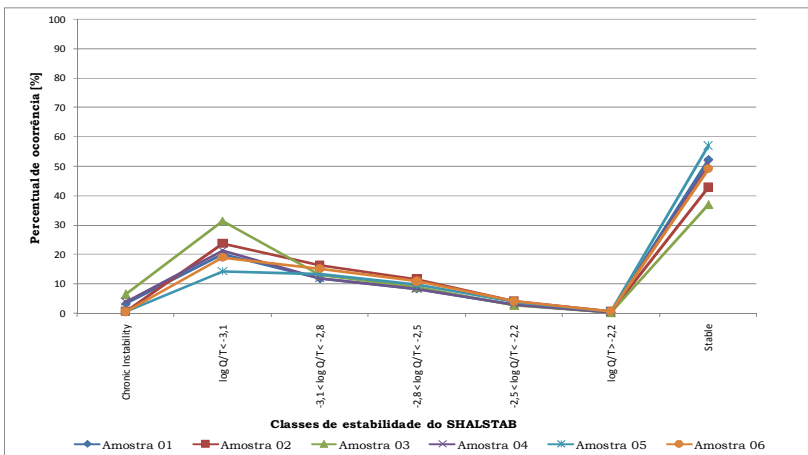


Figura 80 – Variação da estabilidade na profundidade de 12 m

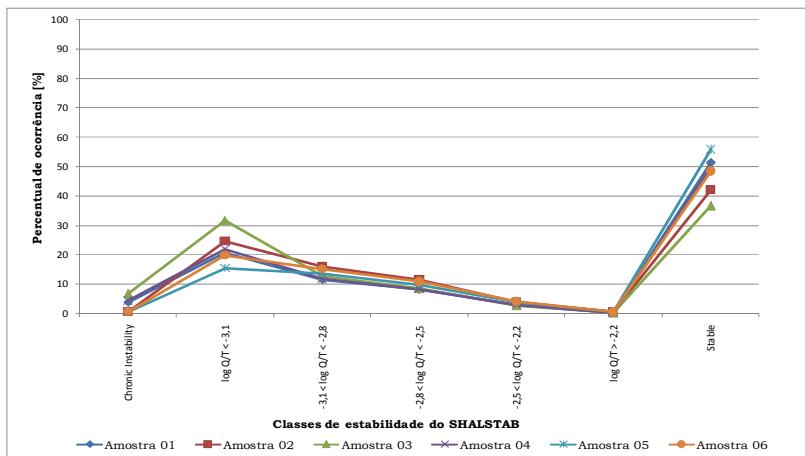


Figura 81 – Variação da estabilidade na profundidade de 13 m

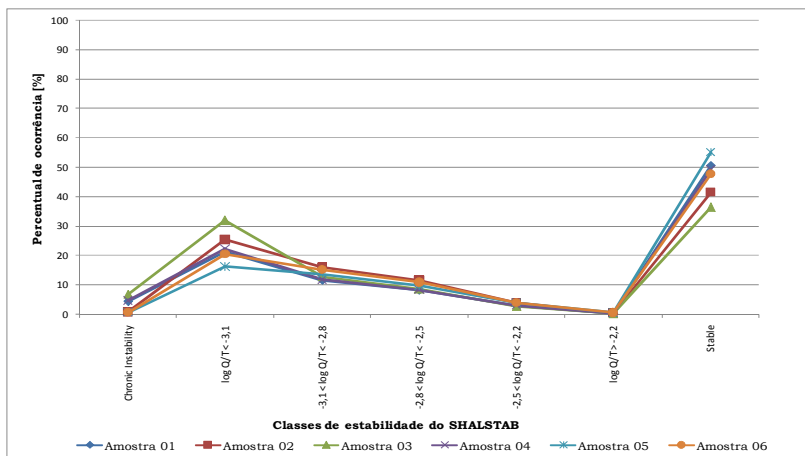


Figura 82 – Variação da estabilidade na profundidade de 14 m

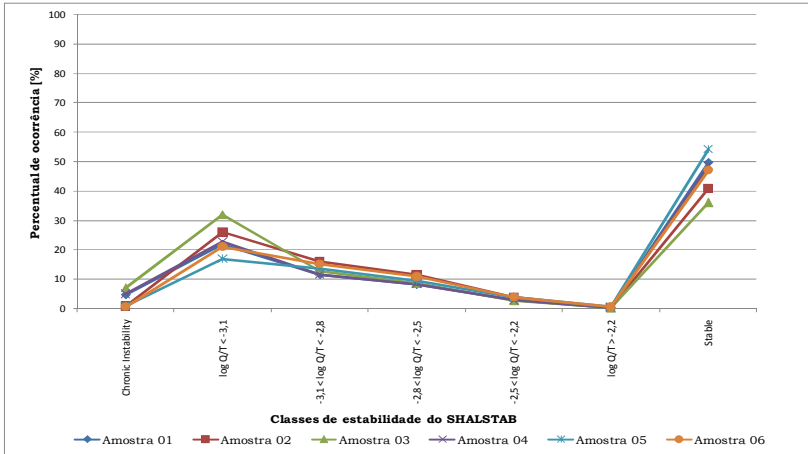


Figura 83 – Variação da estabilidade na profundidade de 15 m

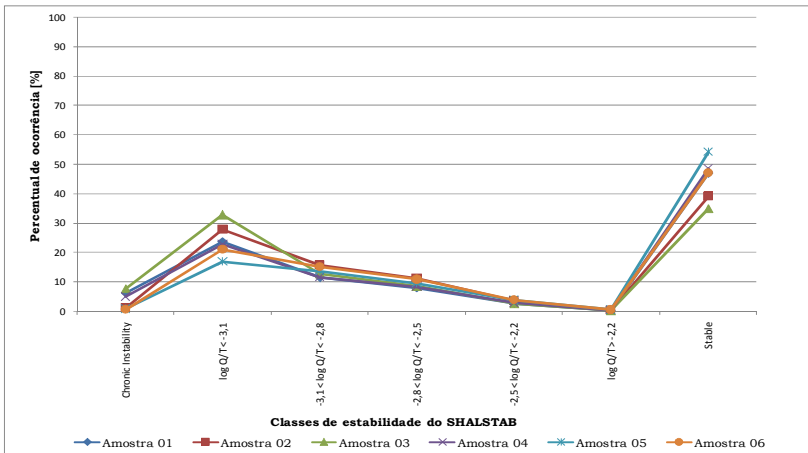


Figura 84 – Variação da estabilidade na profundidade de 20 m

Observando a variação no percentual de cada classe de estabilidade, em função das diferentes amostras de solos empregadas na modelagem, nota-se que em todas as profundidades as classes - Incondicionalmente instável e não saturado ($\log Q \cdot T^{-1}$ menor que -3,1) e Incondicionalmente estável e saturado (*Stable*) - apresentaram as maiores diferenças nos percentuais, mostrando-se mais sensíveis frente a esses parâmetros. Na classe Incondicionalmente estável saturado ($\log Q \cdot T^{-1}$ maior

que -2,2) não houve variação. Nas classes - Estável e não saturado ($\log Q \cdot T^{-1}$ entre -2,5 e -2,2) e Instável e não saturado ($\log Q \cdot T^{-1}$ entre -2,8 e -2,5) - a variação é pouco significativa em relação às classes - Incondicionalmente instável e não saturado ($\log Q \cdot T^{-1}$ menor que -3,1) e Incondicionalmente estável e saturado (*Stable*). Percebe-se ainda, que a partir da profundidade de 10m a variação dos parâmetros dos solos começa a influenciar na classe Incondicionalmente instável e saturado (*Chronic instability*).

Na análise dos gráficos observou-se que a amostra 05 gerou um maior número de áreas estáveis na classe Incondicionalmente estável e saturado (*Stable*). Isto porque apresenta valores de coesão e ângulo de atrito favoráveis a resistência ao cisalhamento do solo, os quais destacam-se dentre as demais amostras (Tabela 29).

A maior instabilidade foi observada na classe Incondicionalmente instável e não saturado ($\log Q \cdot T^{-1}$ menor que -3,1) e Incondicionalmente instável e saturado (*Chronic instability*), principalmente na classe de $\log Q \cdot T^{-1}$ menor que -3,1, associada aos dados da amostra 03. Este solo é caracterizado pelo baixo valor de coesão efetiva, o qual influenciou na instabilidade do solo, mesmo apresentando um ângulo de atrito alto (30°).

Analisando a influência da profundidade do solo nas classes de estabilidade, a partir dos dados das amostras - 01 (Figura 85), 02 (Figura 86), 03 (Figura 87), 04 (Figura 88), 05 (Figura 89) e 06 (Figura 90), nota-se que os percentuais obtidos na profundidade de 5m destacaram-se das demais (exceto em determinadas classes de estabilidade), visto que, o modelo foi desenvolvido para solos rasos.

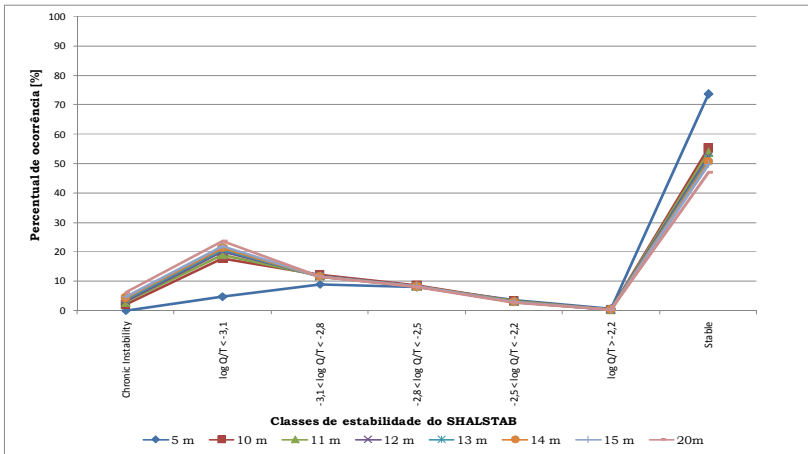


Figura 85 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 1

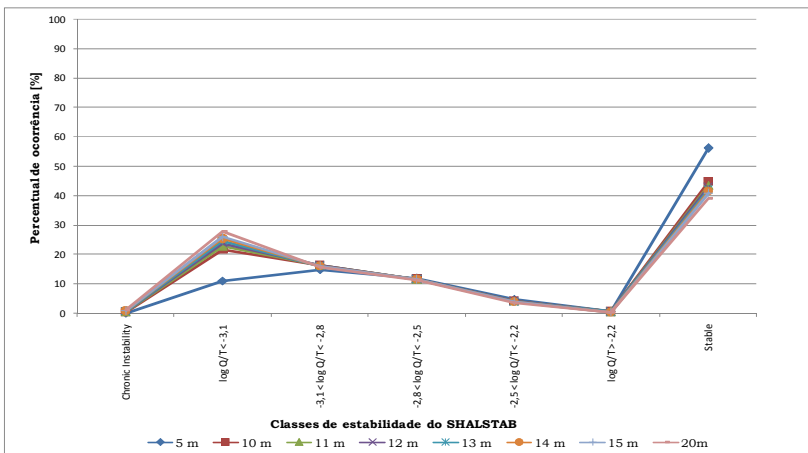


Figura 86 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 2

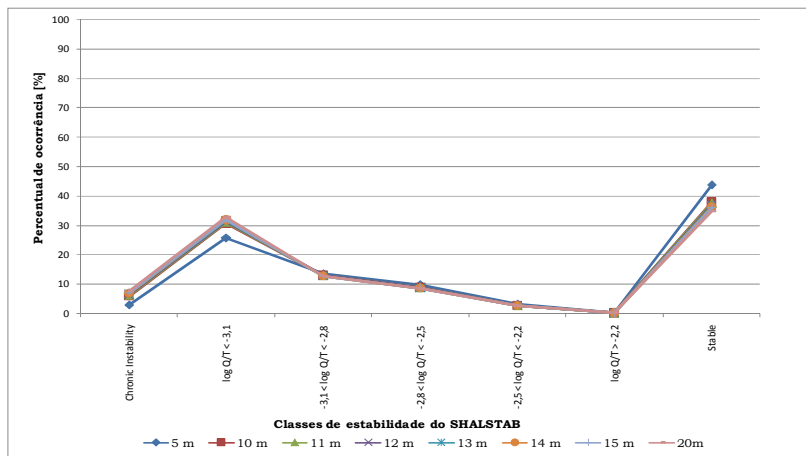


Figura 87 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 3

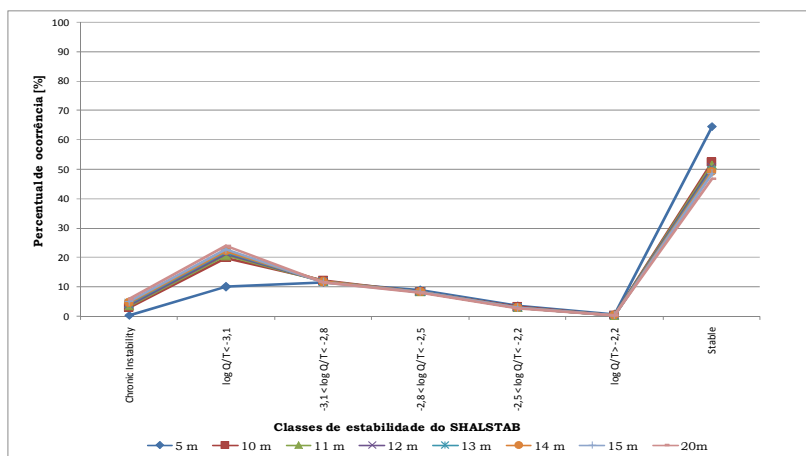


Figura 88 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 4

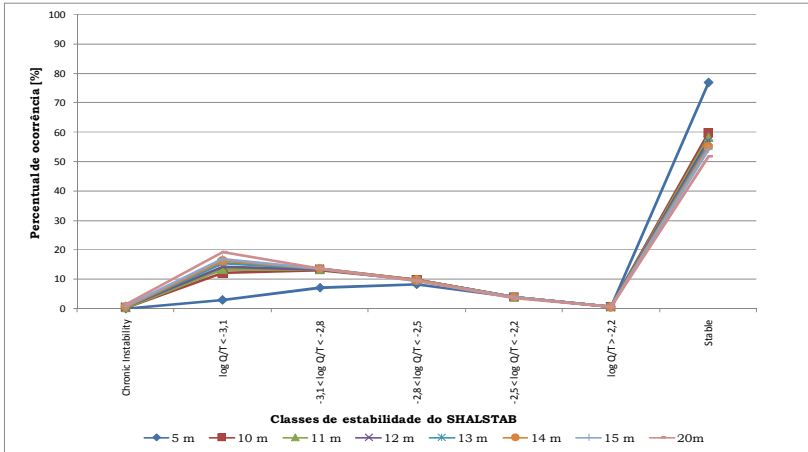


Figura 89 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 5

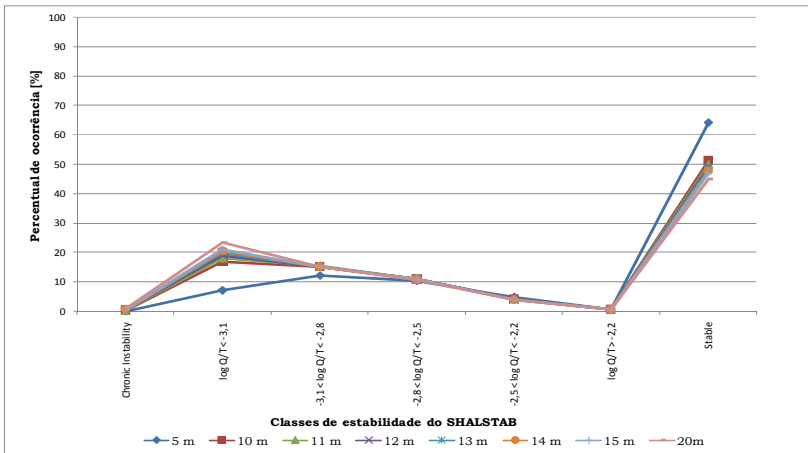


Figura 90 – Variação da estabilidade com a profundidade-amostra 6

Pode-se também observar que, com o aumento da profundidade houve incremento no percentual das áreas instáveis (principalmente na classe Incondicionalmente instável e não saturado - $\log Q/T^1$ menor que -3,1) e o decréscimo das estáveis (Incondicionalmente estável e saturado - *Stable*). Isto segundo Borga et al. (2002), é justificado, pois a medida que a espessura do solo aumenta a estabilidade da encosta diminui. No entanto,

esse fato não foi evidenciado na amostra 03, caracterizada pelo menor valor da coesão do solo.

Com base nas análises ficou evidenciado que a influência dos parâmetros do solo não ocorreu em todas as classes de estabilidade. Entretanto, verificou-se a influência desses dados na classe Incondicionalmente estável e saturado (*Stable*) e na classe Incondicionalmente instável e não saturado ($\log Q \cdot T^{-1}$ menor que -3,1), extremos da estabilidade, justificando a determinação destes parâmetros para uma modelagem com maior acurácia e representatividade do ambiente.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

A partir dos resultados desta pesquisa foi possível concluir que:

- A bacia é caracterizada pelas classes de relevo forte ondulado e montanhoso, correspondente a mais da metade da área total, conferindo ao terreno a presença de encostas com declividades acentuadas que favorecem a ocorrência de movimentos de massa;
- Quatro unidades geotécnicas foram identificadas na bacia, sendo que uma encontra-se em área plana e é de origem sedimentar e as demais, predominando na área se distribuem nas maiores cotas da bacia onde os solos são de origem residual e apresentam depósitos coluvionares;
- A transição entre os grupos de solo sedimentar e residual foi identificada na classe de relevo ondulada. Esta classe marca a transição entre sedimentos colúvio aluvionares, caracterizados pela baixa capacidade de suporte e alta compressibilidade, e solos residuais do gnaiss granulítico, caracterizados pela ocorrência de movimentos de massa;
- Dentre as unidades geotécnicas preliminares, a unidade de solo residual formada por Cambissolo de gnaiss granulítico, apresentou a maior ocorrência dos movimentos de massa, dentre os quais os fluxos de detritos causaram um maior impacto;
- Os fluxos de detritos envolveram solos, blocos de rocha e troncos de árvores movimentados na zona de ruptura por escorregamentos rotacionais e translacionais. Estes escorregamentos ocorreram principalmente em declividades acima de 20°, com vegetação densa e nativa, envolvendo o horizonte C do solo de alteração do gnaiss;
- O uso do solo predominante na bacia é de mata nativa, no entanto há também porcentagens de reflorestamento, pastagens e agricultura. As áreas de

mata nativa compreendem a maioria dos locais onde iniciaram os fluxos de detritos, mesmo com a proteção da cobertura vegetal;

- A simulação 19 foi definida como a situação que melhor representou o cenário da bacia, por enquadrar as zonas de rupturas nas classes instáveis do modelo (menores valores de $Q \cdot T^{-1}$) em um menor percentual de áreas de instabilidade, mostrando um bom ajuste;

- No mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais, mais da metade da bacia foi classificada como estável, predominando a classe incondicionalmente estável e saturada (classe *Stable*). Das classes instáveis a maior ocorrência está na classe incondicionalmente instável e não saturado (classe onde o $\log Q \cdot T^{-1}$ é menor do que -3,1);

- O mapa de suscetibilidade foi comparado com o inventário dos movimentos de massa e identificou em áreas de instabilidade, não somente escorregamentos do tipo translacional, mas também escorregamentos rotacionais (seguidos ou não de fluxo de detritos) e escorregamento do tipo complexo (misto de rotacional e translacional), mapeados em locais com declividades entre 25° e 33°. Ainda previu como instáveis áreas onde não ocorreram escorregamentos no período de intensa pluviometria em 2008 e nas cicatrizes não limitou-se a zona de ruptura, agregando instabilidade a zona de transporte do fluxo;

- Dentre os fatores topográficos, a altitude não foi considerada um fator condicionante na deflagração dos escorregamentos, ao contrário da declividade, comprovando a influência desta variável nos resultados gerados pelo SHALSTAB. A correlação desses fatores, bem como do uso e ocupação do solo com o mapa de suscetibilidade identificou áreas de instabilidade com características ambientais similares às encontradas em campo;

- A influência do conjunto de parâmetros geotécnicos e da profundidade na modelagem não foi identificada em todas as classes de estabilidade, sendo evidenciada em maior percentagem nas classes extremas: Incodicionalmente estável e saturado (classe *Stable*) e incondicionalmente instável e não saturado (classe onde o $\log Q \cdot T^{-1}$ é menor do que -3,1). Isto demonstra que a determinação destes parâmetros é relevante na representatividade do ambiente nesta bacia;
- Duas considerações são importantes para aprimorar os resultados da modelagem de suscetibilidade. Um, refere-se ao refinamento dos dados de entrada, que neste trabalho representam escalas de mapeamentos preliminares e o outro a possibilidade de variar os parâmetros do solo, os quais foram considerados constantes para toda a área da bacia;

Na escolha do mapa de suscetibilidade é importante a verificação em campo das classes definidas como instáveis pelo modelo, identificando a presença de fatores condicionantes à ocorrência dos escorregamentos modelados e a necessidade de incluí-la como área de risco. Desta forma, o mapeamento geotécnico é de fundamental importância na caracterização do problema e dos fatores condicionantes, gerando um banco de dados para modelagens e análises ambientais de maior confiabilidade.

Conclui-se que a metodologia de mapeamento geotécnico e de suscetibilidade utilizada neste estudo é importante, pois gera subsídios para atuar na identificação de áreas sujeitas a movimentos de massa, podendo ser empregada em análises de bacias com características e situações semelhantes, isentas de dados locais.

6.2 Recomendações

- Delimitar as áreas referentes aos depósitos de encostas, identificadas de forma preliminar em campo, e um maior detalhamento do seu comportamento geotécnico.

- Identificar em campo o limiar entre as unidades geotécnicas preliminares de origem residual.
- Caracterizar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da unidade geotécnica PVLgn e Ca, bem como nos solos coluvionares na bacia do Rio Cunha.
- Gerar mapas de instabilidade com o SHALSTAB variando os parâmetros do solo em cada unidade geotécnica.
- Determinar as variáveis necessárias (permeabilidade do solo e chuva crítica) para calibrar o modelo SHALSTAB.
- Caracterizar em campo as áreas identificadas como instáveis pelo SHALSTAB.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Determinação do Limite de Liquidez: Método de Ensaio. RJ. 6p. 1984.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm: Determinação da massa específica dos grãos. RJ. 8p. 1984.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: Determinação do limite de plasticidade. RJ. 3p. 1984.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: Análise Granulométrica. RJ. 1984. 13p.

ANBALAGAN, R.; SHARMA, L.; TYAGI, S. Landslide hazard zonation (LHZ) mapping of a part of Doon valley, Garhwal Himalaya, India. In: CHOWDHURY, R.N.; SIVAKUMAR, M. (Eds.) **Environmentaal Management Geo-water and Engineering Aspects**. Rotterdam: Balkema, p.253-260, 1993.

ANA - Agência Nacional de Águas. Região Hidrográfica Atlântico Sul. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/AtlanticoSul.aspx>>. Acesso em: 03 janeiro de 2012.

ASTM. STANDARD TEST METHOD. Standard Test Method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM D3080. 2004.

ALVES, M. G.; BARROSO, J. A. Técnicas de Geoprocessamento Aplicado ao Diagnóstico de Impactos Ambientais e ao Uso do Solo. In: **IX Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**. São Pedro (SP), CD-rom, 1999.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: **Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro: AMBS/ABGE/PUCRJ, v.2, p.721-733, 1992.

BARROS, W. T.; AMARAL, C. P.; D'ORSI, R. N. Landslide susceptibility map of Rio de Janeiro. In: **Bell (ed.) Landslides**. Balkema, Roterdam: p.869-871, 1992.

BARROSO, J. A.; BARROSO, E. V. O Meio Físico como Fator Indispensável ao Planejamento da Expansão das Cidades: O Caso de Niterói-RJ. **Solos e Rochas**, v.19, p.63-77, 1996.

BERNARDES, J. A. **Investigação Sobre a Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual de Gnaiss**. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul Catarina, Porto Alegre. 2003.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**. v.24, n.1, p.43-69, 1979.

BELOW, R.; WIRTZ, A.; GUHA-SAPIR, D. **Disaster Category - Classification and peril Terminology for Operational Purposes**. Brussels: CRED/Munich: MunichRe Foundation, 19p. 2009.

BISHOP, A. W.; HENKEL, D. J. **The measurement of soil properties in the triaxial test**, 2 ed, Edward Arnold Ltd., London, second edition, 1962.

BORGA, M.; FONTANA, G.D.; GREGORETTI, C.; MARCHI, L. **Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability**. **Hydrological Processes**, v.16, 2002.

CARRARA, A.; CARDINALI, M.; DETTI, R.; GUZZETTI, F.; PASQUI, V.; REICHENBACH, P. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.16, p.427-445, 1991.

CEPED - CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. **Resposta ao desastre em Santa Catarina no ano de 2008: avaliação das áreas atingidas por movimentos de massa e dos danos em edificações durante o desastre**. Relatório Técnico, Florianópolis, 2009.

CERRI, L.E.S. **Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para prevenção de acidentes**. 197p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro. 1993.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo, Edgard Blucher, p.236, 1999.

CNRH. CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Institui a divisão hidrográfica nacional, em regiões hidrográficas, com a**

finalidade de orientar, fundamentar e implementar o plano nacional de recursos hídricos. Resolução n.32. 2003.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Campinas, SP:IG/Unicamp, 170p. 1999.

CUNHA, M.A. (Org). **Ocupação de encostas.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, p.234, 1991.

DAS, B.M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** Cengage Learning São Paulo, 2011.

DAVISON DIAS, R. **Aplicação de Pedologia e Geotecnia no Projeto de Fundações de Linhas de Transmissão.** 309p . Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1987.

DAVISON DIAS, R. Proposta de Metodologia de Definição de Carta Geotécnica Básica em Regiões Tropicais e Subtropicais. In: **Revista do Instituto Geológico.** São Paulo, p.51-55, 1995.

DAVISON DIAS, R. Proposta de uma Metodologia de Estudos Geotécnicos para Implantação de Rodovias, Estradas Rurais e Vicinais em Solos Brasileiros. In: **Anais da Reunião Anual de Pavimentação.** Florianópolis, 2001.

DELGADO, J.A.C. **Avaliação da suscetibilidade a deslizamentos por meio do uso de sistema de informações geográficas: aplicação em uma área do eixo cafeeiro colombiano.** 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília Distrito Federal. 2006.

DIAS, L.S.O. **Identificação de Áreas Suscetíveis a Deslizamento de Terra Utilizando Sistema de Informações Geográficas.** 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Universidade Federal Da Bahia, Salvador. 2006.

DIETRICH, W.E.; MONTGOMERY, D.R. SHALSTAB: **A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential.** National Council for Air and Stream Improvement, p.26, 1998.

DINIZ, N.C. **Automação da Cartografia Geotécnica: uma Ferramenta de Estudo e Projetos para Avaliação Ambiental.** 297p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, São Paulo. 1998.

EASTMAN, J.R. Idrisi Andes – **Guide to GIS and Image Processing**. Clark Laboratory. Clark Labs, Clark university, Worcester/MA. USA. 284p. 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Solos – Ministério de Agricultura e Abastecimento. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília (DF): Serviço de Produção de Informação (SPI), p.411, 1999.

FERNANDES, N.F., AMARAL, C.P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B. (Org) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand, p.123-194, 1996.

FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R., GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.2, n.1, p.51-71, 2001.

FERNANDES, N.F.; GUIMARAES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. **CATENA**, v.55, n.2, p.163-181, 2004.

FONSECA, A.P.; SILVA, T.R.M.; LACERDA, W.A.; SANTOS, R.M. Resistência ao cisalhamento de solos coluvionares de diferentes idades. In: **Anais do XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. São Paulo, v.1, p.499-505, 2002.

FRAGA, A.J. **Pesquisa Histórica e Geográfica - Rio dos Cedros e Atuação do Circulo Trentino de Rio dos Cedros**. 2ª Ed. 2009. Disponível em: <http://www.circolotrentino.com.br/site/downloads/arquivos/pesquisa_circulo.pdf>. Acesso em 27 de abril de 2011.

FREIRE, E.S.M. Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. **Construção**, Rio de Janeiro, n.8, p.10-18, 1965.

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M.; LOURENÇO, L.L.; GRANDO, A. Características gerais dos escorregamentos ocorridos em novembro de 2008 nos municípios de Brusque, Rio dos Cedros e Timbó – SC. In: **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. Viçosa: UFV, 16p. 2009

GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; FERNANDES, N.F. Análise da influência da escala cartográfica no resultado de um modelo de previsão de áreas críticas a deslizamentos. **Ciência e Natura**, UFSM, p.269-286, 2004.

GOMES, R.A.T. **Modelagem de Previsão de Movimentos de Massa a Partir da Combinação de Modelos de Escorregamentos e Corridas de Massa**. 180p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.

GOSTNER, W.; BEZZOLA, G.R.; SCHATZMANN, M.; MINOR, H. E. Water-related natural disasters: strategies to deal with debris flows: the case of Tschengls, Italy. In: **Wiegandt, E. (Ed.) Mountains: sources of water, sources of knowledge**. Dordrecht, Netherlands, v. 31, p.221-242, 2008.

GRANDO, A.; MACIEL, C.B.; CORSEUIL C.W.; MACCARINI M.; KOBAYAMA M.; HIGASHI R. A. R. Desastres Naturais e Antropogênicos: estudo de caso do projeto reposta ao desastre em Santa Catarina no ano de 2008. ABRH 2009. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH**. Campo Grande, CD-rom 14p., 2009.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. Edgard Blucher, 194p. 1984.

GUIMARÃES, R. F. **Utilização de um Modelo de Previsão de Áreas Suscetíveis a Escorregamentos Rasos com Controle Topográfico: Adequação e Calibração em Duas Bacias de Drenagem**. 150p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2000.

GUIMARÃES, R.F.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H.M.; FERNANDES, N.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v.2, 137, p.1-10, 2003.

GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T.; FERNANDES, N.F. Movimentos de Massa. In: **FLORENZANO, T.G. (Org.) Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficinas de Texto. p.159-184. 2008.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and

their application in a multi-scale study, Central Italy.

Geomorphology, Amsterdam, v.31, p.181-216, 1999.

HIGASHI, R.R. **Utilização de um SIG no Desenvolvimento de um Banco de Dados Geotécnicos do Norte do Estado do Rio Grande do Sul**. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.

HIGASHI, R.A.R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. 486p . Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.

HIGASHI, R.A.R.; MICHEL G.P. Uso do Shalstab na Análise espacial da estabilidade de encostas visando a implantação de vias – aplicação em sub-bacias do Rio Tubarão. In: **6° Seminário Nacional Modernas Técnicas Rodoviárias**. Anais. Florianópolis: ABMS, 1994. v.4. p.1245-1252. 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeto Gerenciamento Costeiro GERCO – 3° Fase: Relatório Técnico. Rio de Janeiro, 2003.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLER, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 109p., 2006.

KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; GIGLIO, J.N.; MICHEL, G.P.; GOERL, R.F.; CORSEUIL, C.W. Aprender hidrologia para prevenção de desastres naturais. In. **X Congresso Iberoamericano de Extensión Universitária**. Montevideú, 13p., 2009.

KOBIYAMA, M.; REGINATTO, G.M.P.; MICHEL G.P. Contribuição da engenharia de sedimentos ao planejamento territorial com ênfase em redução de desastres hidrológicos. In: **IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, Brasília, 2010.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F.; CORREA, G.P.; MICHEL, G.P. Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorological and geomorphic aspects. In: **WRACHIEN, D.; BREBBIA, C.A. (Org) Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows III**. Southampton: WITpress. p.77-88. 2010.

MACCARINI, M. **Ensaios Triaxiais e de Cisalhamento Direto no Solo Residual Gnáissico Jovem do Campo Experimental da PUC-Rio, Gávea RJ**. 254p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1980

MATTEDI, M.A.; FRANK, B.; SEVEGNANI, L.; BOHN, N. O desastre se tornou rotina... In: FRANK, B.; SEVEGNANI, L. (Org). **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí**. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí, p.14 -21, 2009.

MEISINA, C.; SCARABELLI, S. A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. **Geomorphology**, v. 87, p.207-223, 2007.

MENDONÇA, M. B.; PEREIRA, G. I. M.; MARQUES, E. A. G. Diagnóstico e Proposta para Tratamento de Áreas de Risco Geotécnico: Um Trabalho Desenvolvido em Encostas Urbanas de Niterói, RJ. In: **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, Rio de Janeiro (RJ),), v. 2, p.439-449, 1996.

MICHEL, G.P.; GOERL R.F.; KOBIYAMA, M. Aplicação do SINMAP (Stability Index Mapping) na bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros-SC, para previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos. In: **VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia**, 2010.

MICHEL, G.P. **Estudo de escorregamentos na Bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC, com modelos SHALSTAB e SINMAP**. 84p. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2011.

MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E.A. Physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v.30, n.4, p.1153-1171. 1994.

MUNSELL, Soil Color Charts. Baltimore: Munsell Color Company, 1971.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Identificação Expedita dos Grupos da Classificação MCT para Solos Tropicais**. In: X COBRANSEF, vol.4, Foz do Iguaçu-PR. 1994.

NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo, Editora Villibor, 213p, 1995.

O'LOUGHLIN, E.M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v.22, n.5, p.794-804. 1986.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 2a Edição, São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

PREFEITURA MUNICIPAL DE RIO DOS CEDROS. Informações gerais. Disponível em: <<http://www.riodoscedros.sc.gov.br>>. Acesso em: 27 de abril de 2011.

RAIMUNDO, H.A. **Aspectos Geotécnicos e Pluviométricos associados a instabilidade de encostas em Florianópolis- SC**. 325p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1998.

RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; REDIVO, A.L.; GOMES, R.A.T.; FERNANDES, N.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente ArcView, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na região do Quadrilátero Ferrífero (MG). **Espaço & Geografia**, Brasília, v.5, n. 1, p.49-67, 2002.

RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; REDIVO, A.L.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; FERNANDES, N.F.; GOMES, R.A.T. Avaliação de Metodologias de Determinação do Cálculo de Áreas de Contribuição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 4, n.2, p.41-49, 2003.

RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; REDIVO, A.L.; GOMES, R.A.T.; CARDOSO, F.B.F.; FERNANDES, N.F. Algorithm Development for Incorporating Soil Physical Properties of each Different Soil Class in a Landslide Prediction Model (SHALSTAB). **Soils and Rocks**, v. 30, n. 3, p.139-148, 2007.

REDIVO, A.L.; RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T. Determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos na BR 256 no município de Ouro Preto - MG. **Ciência e Natura**, UFSM, p.31-46, 2004.

ROCHA, H.L. **Aplicação do modelo Flo-2D para simulação de fluxos de detritos na bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC**. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2011.

ROCHA, H.L., KOBİYAMA, M.; SILVA, C.G. Análise estatística de chuvas intensas ocorridas nos municípios de Blumenau e Rio dos

Cedros, SC, no período de agosto de 2008 a janeiro de 2009. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH**. Campo Grande, CD-rom 14p., 2009.

SELBY, M.J. **Hillslope materials and processes**. Oxford University Press Inc., New York, 2º ed., 450p., 1993.

SANTA CATARINA - GABINETE DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL. **Atlas de Santa Catarina**. Florianópolis: GAPLAN/SUEGI; Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, il., mapas. 173p., 1986.

SANTOS, W.; VIEIRA, B.C. Influência de fatores topográficos na distribuição de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar, Cubatão (SP). In: **XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Viçosa, 2009.

SCHEUREN, J.M.; WAROUX, O.P.; BELOW, R.; GUHA-SAPIR, D. Annual Disaster Statistical Review: the Numbers and Trends 2007. Brussels: CRED / Munich: MunichRe Foundation, 47p., 2008.

SOARES, J.E.S.; POLITANO, C.F. **Deslizamento de massa de solo de grandes dimensões, encosta de Piraquara**. Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro: ABMS/ABMS, 1997.

SOARES, J.M.D; PINHEIRO, R.J.B.; MACIEL FILHO, C.L.; ROBAINA, L.A.; BICA, A.V.D.; BRESSANI, L.A. Estudo da estabilidade de encosta em área urbana no município de Santa Maria. In: **Anais da 3ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE)**, Rio de Janeiro: ABMS, p.199-206. 2001.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C.J. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: TURNER, A.K.; SCHUSTER, R.L. (eds.) **Landslides: Investigation and mitigation**. Washington: National Academy Press, 1996. p.129-177. (Special Report 247, Transportation Research Board).

TEIXEIRA, V. H. **Características Geotécnicas dos Solos e Rochas de Santa Catarina e sua Correlação**. 1993.

TERZAGHI, K. 1952. Mecanismo dos escorregamentos de terra. In: **PICHLER, E. Revista Politécnica**. São Paulo, n. 167, 1967.

TOMINAGA, L.K. Escorregamentos. In: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org) **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, p.25-160, 2009.

UN-ISDR – United Nations International Strategy for Disaster Reduction – Living with Risk. A Global Review of Disaster Reduction Initiatives. United nation. Geneva, Suíça.2002. Disponível em http://www.unisdr.org/eng/about_isdr/bd-lwr-2004-eng.htm.

VARNES, D.J. Slope movement types and processes. In: **R.J. Schuster and R.J. Krizek (eds), Landslides, Analysis and Control**. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, DC. Special Report 176, p.11-33, 1978.

WICANDER, R.; MONROE, J.S.; PETERS, E.K. Essentials of geology. In: Fundamentos de Geologia. Tradução AVRITCHER, H. O. Revisão CARNEIRO, M. C. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

WOLLE, C.M.; CARVALHO, C.S. Deslizamento em Encostas na Serra do Mar - Brasil. **Revista Solos e Rochas**, Rio de Janeiro, v.12, p.27-36, 1989.

ZAIDAN, R.T.; FERNANDES, N.F. Zoneamento de Susceptibilidade a escorregamentos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do Córrego da Independência - Juiz de Fora (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.10, n.2, 2009.

ANEXOS

Anexo I

ESCORREGAMENTOS E FENÔMENOS CONEXOS (Fonte: GUIDICINI e NIEBLE, 1984)

TIPO FUNDAM.	SUB TIPO	CLASSES PRINCIPAIS	NATUREZA DA SUPERFÍCIE DE ESCORREGAMENTO	INCLIN. DE TALUDE	MOVIMENTO		
					CARACTERÍSTICAS	TIPO	VELOC. E DURAÇÃO
1. ESCOMBROS (Comments, Slings)	1.1. BASTEJO, REPTAÇÃO (Crawl, slow flow, line)	1.1.1. RASTEJO DE SOLO (Soil creep) 1.1.2. RASTEJO DE DETR. DE TALUS (Talus creep) 1.1.3. RASTEJO DE ROCHA (Rock creep, incluindo frana ad uncino, out-crop creep ou hakenwerfen, curvatura de estrato) 1.1.4. SOLFLUXÃO (Soil-function) 1.1.5. RASTEJO DE DETRITOS (Rock Glacier creep)	Superfícies múltiplas de neofomação, tanto no conjunto, quanto nos movimentos individuais. Tendência das primeiras a se aprofundarem.	Suave, mesmo próxima a 0°	Movin. ou deform. plástica, movimentação lenta do domínio da hidraul. dos liq. visc. Interessando camadas superiores da formação em manter com teor de água relat. baixo. Superação da resist. fundam. ao cisalham. Comparável as deform. tectônicas. Interesse às vezes toda uma região.	Translação predomin. horiz. (no conjunto). Deform. plásticas irregulares em todas as direções e sentidos. (movim. De detalhes)	Longa duração. veloc. Baixa e mesmo imperceptível (3 a 5/an), aumentando com o teor de água e inclinação. Movim. Locais ocasionalmente rápidos.
	1.2. CORRIDAS (Rapid flow-collapse)	1.2.1. CORRIDA DE TERRA (Earth-flow) 1.2.2. CORRIDA DE AREIA OU SILTE (Liquefaction flow slide) 1.2.3. CORRIDA DE LAMA (Mud-flow) 1.2.3.1. TIPO DE REGAÃO ÁRIDA, SEM-ÁRIDA OU ALPINA 1.2.3.2. TIPO VULCÂNICO (Lava di fango) 1.2.3.3. REFLUXIMENTO DE PÂNTANO (Out-flow, bunting, scarp-slumping) 1.2.3.4. AVALANCHE DE DETRITOS (Debris avalanches).	Superfície pré-existente sobre a qual se dá o movimento do conjunto de material alóctone. Tendência de aprofundamento e erosão da superfície de escorregamento.	Variável	Movin. ráp. de caráter essencialm. Hidrodinâmico. ocasionado pela avaliação de atrito int. em virtude da destr. da estrutura, em presença de excesso de água. Interesse áreas relativ. Pequenas, salvo em casos excepcionais.	Transl. Com inclim. De pequena a grande, sobre o plano horizontal.	Curta duração, veloc. De alta a muito alta, podendo ser praticamente instantânea.
2. ESCORREGAMENTOS (Slides) (Slides, Trans)	2.1. ESCORREGAMENTOS ROTACIONAIS (Simple, Ballance tier slides)	2.1.1. ESCORREGAMENTO DE TALUDES (Slope-failure) 2.1.2. ESCORREGAMENTO DE BASE (Base failure) 2.1.3. ROTURA ROTACIONAL DO SOLO DE FUNDAÇÃO	Superfície de escorregamento cilindro circular de neofomação	De regular à forte	Movin. relativ. rápida de uma parte de maciço sobre a outra, por sup. de resist. ao cisalham. podendo haver ou não destr. parcial ou total da estrutura da massa escorregada. Pode ocorrer mesmo em rocha viva. Interesse áreas relat. pequenas.	Rotação e translação	Curta duração, veloc. De alta a muito alta (de 0 a 30 cm/h), podendo ser quase instantâneo. Em alguns casos após o desprendimento, a veloc. Passa à de queda livre
	2.2. ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS	2.2.1. ESCORREGAMENTO TRANSLAC. DE ROCHA 2.2.1.1. SEM CONTROLE ESTRUTURAL 2.2.1.2. COM CONTROLE ESTRUTURAL 2.2.2. ESCORREGAMENTO TRANSLAC. DE SOLO 2.2.3. ESCORREGAMENTO TRANSLAC. RETROGRESSIVO 2.2.4. ESCORREGAMENTO TRANSLAC. QUESADA DE ROCHA 2.2.6. QUESADA DE DETRITOS	Superfície de escorregamento plana, podendo ser de neofomação ou pré-existente. No segundo caso, o escorregamento diz-se condicionado.	De regular à forte	Movin. relativ. rápido de uma parte do maciço sobre a outra completam. No domínio da mecânica dos sólidos, por superação da resist. Do cisalhamento (coesão-atrito int.), ou de aderência (qto existe superfície de descontinuidade condicionadora de movimento). Interesse geralmente áreas pequenas.	Transl. predomin. horizontal a simples queda vertical (Transl. vertical).	
3. SUBSIDÊNCIAS (Sinking)	3.1. SUBSIDÊNCIAS (Proportionalmente alta)	3.1.1. POR CARREAMENTO DE GRãos 3.1.2. POR DISSOLUÇÃO DE CAMADAS INFERIORES E CAVERNAS 3.1.3. POR DEFORMAÇÕES DE ESTRATOS INF. INCLUSIVE POR DEFORMAÇÕES TECTÔNICAS E DEFORMAÇÃO POR ACÚMULO DE SEDIMENTOS 3.1.4. POR ROTURA DE ESTRATOS INFERIORES 3.1.5. POR RETIRADA DO SUPORTE LATERAL.	Superfície de deslizamento de altitude vertical, múltiplos variáveis, em geral de neofomação	Aprox. nula	Deslocamento ou deform. essencialmente vertical, implicando depressão, afundam, recalque, desmoronamento, causado por plastif., fluidificação, deformação, rotura ou remoção total ou parcial do substrato, ou sem influência de carregamento externo. Extensão, em geral, limitada. As vezes alta registres extensas.	Deform. Plást. ou elástica vertical e as vezes, translação vertical	Curta duração, geralm. (3.1.4, 3.1.5, 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3). Longa nos outros cinco casos. Velocidade em geral pequena, as vezes grande.
	3.2. RECALQUES	3.2.1. POR CONSOLIDAÇÃO (Expulsão de água) 3.2.2. POR COMPACTAÇÃO (Expulsão de ar ou outros gases)					
	3.3. DESABA-MENTOS	3.3.1. POR ROTURA DE CAMADA 3.3.2. POR SUBSCAVAÇÃO 3.3.3. POR RETIRADA DO SUPORTE LATERAL					
		FORMAS DE TRANSIÇÃO OU TERMOS DE PASSAGEM		variável	Formas de transição entre as anteriores.	Complexos ou múltiplos	Depende dos tipos correlacionados ou associados
		MOVIMENTOS DE MASSA COMPLEXOS		variável	Combinação das formas anteriores.		

Anexo II

Classes granulométricas	
Classe	Característica
Muito argilosa	Classe textural com mais de 60% de argila.
Argilosa	Compreende as classes texturais argila, argila arenosa, argila siltosa, franco-argiloso e franco-argilo-siltoso, com teores de argila entre 35 e 60%.
Média	Compreende as classes texturais com menos de 35% de argila e mais de 15% de areia, exceto areia e areia franca.
Arenosa	Compreende as classes texturais areia e areia franca.
Siltosa	Compreende parte de classes texturais que tenham mais de 50% de silte, menos que 35% de argila e menos que 15% de areia.

Fonte: IBGE (2003)

Anexo III

Classes de relevo baseado no Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos da EMBRAPA

Classes de relevo	Característica	Intervalos de declividade [%]
Plano	Superfície de topografia esbatida ou horizontal com declives menores que 3%.	0 a 3
Suave ondulado	Superfície topográfica pouco movimentada, apresentando declives suaves de 3 a 8%. Constituída por conjunto de colinas ou outeiro (elevações de atitudes relativas até 50 m e de 50 a 100 m).	3 a 8
Ondulado	Superfície de topografia pouco movimentada com predominância de colinas ou outeiros com declives moderados, variando de 8 a 20%.	8 a 20
Forte ondulado	Superfície de topografia movimentada com predominância de declives de 20 a 45%. Formada predominantemente por outeiros ou morros (elevações de 50 a 100 m e de 100 a 200 m de altitudes), com declives fortes.	20 a 45
Montanhoso	Superfície topográfica muito movimentada representada por morros, montanhas, maciços e alinhamentos montanhosos com declives da ordem de 45 a 75%. Apresentam desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes ou muito fortes.	45 a 75
Escarpado	Superfície topográfica extremamente movimentada com predominância de formas abruptas com superfícies íngrimes (aparados, itaimbês, frentes de cuevas, falésias e vertentes de declives muito fortes). Apresentam declives maiores que 75%.	Maior que 75

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (1999) e IBGE (2003)

Anexo IV

Descrição dos métodos expeditos de caracterização das amostras	
Característica	Procedimentos Expeditos
Granulometria	a) Análise tátil-visual: identificar através do contato com o material (na umidade natural e umedecido) a presença de areia, silte ou argila, nominando em primeiro lugar a granulometria predominante.
	b) Resistência a seco ^{1,2} : útil para distinguir se o material apresenta comportamento de silte ou argila. Procedimento: umedecer o solo, moldar uma esfera, deixá-la secar e quebrá-la. Identificar a resistência que a esfera apresenta ao ser solicitada e observar a forma com que se rompe. Nota-se que nessas condições, as esferas formadas por argilas apresentam maior resistência e partem em pedaços bem distintos. As esferas compostas predominantemente por siltes rompem com maior facilidade e apresentam partículas pulverizáveis.
	c) Teste de dispersão ¹ : versar uma colher de sopa da amostra num recipiente transparente contendo meio copo d'água limpa (nesse estudo foi usada água destilada), agitar e deixar em repouso. Observar a coloração da água e a presença de material sedimentado nos seguintes tempos: 2 minutos, 10 minutos e 1 hora. Nota-se que a areia deposita-se em aproximadamente 2 minutos, o silte entre 10 minutos e 1 hora, a argila em várias horas e a matéria orgânica sobe à superfície. Este procedimento só é realizado nos casos em que persistirem dúvidas em relação aos procedimentos realizados em (a) e (b).
	d) Mica: Indicar a presença de mica no solo observando a existência de partículas com brilho nas amostras. A presença de mica pode indicar solos expansivos.
Odor	Análise tátil-visual: verificar a existência de matéria orgânica no solo através do odor característico de material decomposto.
Consistência	Análise tátil-visual: identificar se o solo encontra-se úmido ou seco e verificar a sua consistência no estado natural (mole ou rígida). Materiais úmidos e moles podem caracterizar solos sedimentares e hidromórficos.

Fonte: ⁽¹⁾, ⁽²⁾ Pinto (2000), ⁽³⁾ Munsell (1971) e Comissão de solos (1960 *apud* HIGASHI, 2006)

Descrição dos métodos expeditos de caracterização das amostras	
Característica	Procedimentos Expeditos
Cor	<p>Estimar a cor do solo, na umidade natural, através da comparação da amostracom a tabela de Munsell³: na classificação expor a superfície interna da amostra para comparar a sua coloração com a tabela, anotando o matiz (<i>hue</i>), o valor (<i>value</i>) e o croma (<i>chroma</i>). O matiz é representado por números e letras, o valor pelo denominador de uma fração e o croma pelo numerador, compondo a sigla de identificação da cor do solo (exemplo: 7.5YR8/4). A cada sigla está associado o nome do solo em inglês, que pode ser traduzido para o português. Sugere-se identificar inicialmente se a amostra possui colorações avermelhadas (matiz R), alaranjadas (matiz YR) ou amareladas (Y), para então definir os demais dados. Normalmente a coloração da amostra não corresponde exatamente com as cores da tabela.</p> <p>Solos residuais normalmente apresentam por cores quentes (avermelhadas e amareladas) e os solos sedimentares coloração acinzentada.</p>
Fonte: ⁽¹⁾ , ⁽²⁾ Pinto (2000), ⁽³⁾ Munsell (1971) e Comissão de solos (1960 <i>apud</i> HIGASHI, 2006)	

Ilustrações dos métodos expeditos de caracterização das amostras



Anexo V

Caracterização das amostras de solos residuais	
Textura	Percentual de ocorrência [%]
Argilo arenosa com mica	8
Argilo siltoso com areia e mica	8
Silte arenoso com mica	8
Silte argiloso	17
Silte argiloso com areia	9
Silte argiloso com mica	50
Cor	
Amarelo avermelhado	41
Bruno	17
Bruno amarelado	25
Vermelho	17
Altitude [m]	Percentual de ocorrência [%]
120-140	25
140-160	33
160-180	9
440-460	33
Classe de relevo	Percentual de ocorrência [%]
Forte ondulado	50
Ondulado	33
Suave Ondulado	17
Uso e ocupação do solo	Percentual de ocorrência [%]
Agricultura	42
Mata nativa	8
Pastagem	50

Caracterização das amostras de solos sedimentares

Textura	Percentual de ocorrência [%]
Areno argiloso com mica	3
Areno siltoso	13
Argilo arenoso	10
Argilo arenoso com mica	29
Argilo siltoso com areia e com mica	3
Argilo siltoso com mica	5
Não foi possível identificar	10
Silte arenoso	3
Silte arenoso com mica	3
Silte argiloso com areia	3
Silte argiloso com areia e com mica	5
Silte argiloso com mica	13
Cor	
Amarelo avermelhado	8
Amarelo brunado	16
Bruno	29
Bruno amarelado	26
Bruno claro	3
Bruno amarelado escuro	5
Cinzeno avermelhado	3
Não foi possível identificar	10
Altitude [m]	Percentual de ocorrência [%]
120-140	5
140-160	37
420-440	5
440-460	53
Classe de relevo	Percentual de ocorrência [%]
Plano	26
Suave Ondulado	40
Ondulado	34
Uso e ocupação do solo	Percentual de ocorrência [%]
Agricultura	8
Pastagem	74
Solo exposto	5
Terreno alagado	13

Anexo VI

Características dos solos em condições naturais pertencentes às classes MCT: NA, NA', NS', NG' e LG'

Grupo MCT	Descrição
NA	(i) Areias, siltes e misturas de areias e silte constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica; (ii) Praticamente não possuem finos argilosos coesivos; (iii) Tipo genético representativo: saprolítico associado a rochas sedimentares ou metamórficas; (iv) Podem apresentar alguns solos não tropicais de origem pedogenética ou transportada; (iv) Areais e siltes quartzosos são não expansivos ou muito pouco expansivos e variedades micáceas podem ser altamente expansivas.
NA'	(i) Areias quartzosas com finos passando na peneira 0,0075 mm; (ii) Tipo genético representativo: saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo tais como: granito, gneisses arenitos e quartzitos impuros; (iii) Podem ser excessivamente expansivos e muito sujeitas à erosão hidráulica.
NS'	(i) Solos, sobretudo saprolíticos silto-arenosos, resultantes do intemperismo tropical nas rochas eruptivas e metamórficas, de constituição predominantemente feldspática-micácea-quartzosa; (ii) Em condições naturais apresentam geralmente baixa massa específica aparente seca, podem ser colapsíveis e ter baixa capacidade de suporte; (iii) Predominam variedades com erodibilidade média a elevada, nos taludes de corte.
NG'	(i) Solos saprolíticos argilosos que derivam de rochas sedimentares argilosas (folhelhos, argilitos, siltitos) ou cristalinas, pobres em quartzo e ricas em anfíbios, piroxênios e feldspatos cálcicos; (ii) Classificam-se nesse grupo solos superficiais pedogenéticos (vertissolos), bem como muitos solos transportados.
LG'	(i) Argilas e argilas arenosas, que constituem o horizonte B latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas; (ii) Apresentam colapsibilidade por imersão em água, sobretudo quando apresentam agregados bem desenvolvidos. Nessa condição são altamente permeáveis e costumam dar taludes de cortes não sujeitos à erosão pluvial.

Fonte: Nogami e Villibor (1995)

Anexo VII**Resultados das simulações com o SHALSTAB**

Resultado da simulação 01							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	0,1	0,1	0,0	0,0	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	4,8	4,9	0,8	0,8	1	16,7	16,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	9,0	13,9	1,5	2,2	3	50,0	66,7
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,1	22,0	1,3	3,6	1	16,7	83,3
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,7	25,7	0,6	4,1	1	16,7	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	26,3	0,1	4,2	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	73,7	100,0	11,9	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 02							
<i>Chronic Instability</i>	0,1	0,1	0,0	0,0	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	11,1	11,2	1,8	1,8	2	33,3	33,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	14,9	26,2	2,4	4,2	2	33,3	66,7
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,9	38,0	1,9	6,1	2	33,3	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,9	43,0	0,8	6,9	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,8	43,8	0,1	7,1	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	56,3	100,0	9,1	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 03							
<i>Chronic Instability</i>	3,0	3,0	0,5	0,5	2	33,3	33,3
log Q/T < -3,1	25,9	28,9	4,2	4,7	3	50,0	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,7	42,6	2,2	6,9	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	9,7	52,4	1,6	8,4	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,3	55,7	0,5	9,0	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,4	56,1	0,1	9,0	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	43,9	100,0	7,1	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 04							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	0,4	0,4	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	10,1	10,5	1,6	1,7	2	33,3	33,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,7	22,2	1,9	3,6	2	33,3	66,7
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,9	31,1	1,4	5,0	2	33,3	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,7	34,8	0,6	5,6	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	35,4	0,1	5,7	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	64,6	100,0	10,4	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 05							
<i>Chronic Instability</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	3,0	3,0	0,5	0,5	0	0,0	0,0
-3,1 < log Q/T < -2,8	7,1	10,1	1,1	1,6	3	50,0	50,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,3	18,4	1,3	3,0	2	33,3	83,3
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,0	22,4	0,6	3,6	1	16,7	100,0
log Q/T > -2,2	0,7	23,0	0,1	3,7	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	77,0	100,0	12,4	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 06							
<i>Chronic Instability</i>	0,1	0,1	0,0	0,0	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	7,3	7,3	1,2	1,2	1	16,7	16,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	12,3	19,6	2,0	3,2	3	50,0	66,7
-2,8 < log Q/T < -2,5	10,6	30,2	1,7	4,9	1	16,7	83,3
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,7	34,9	0,8	5,6	1	16,7	100,0
log Q/T > -2,2	0,8	35,7	0,1	5,8	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	64,3	100,0	10,4	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 07							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	2,3	2,3	0,4	0,4	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	18,0	20,2	2,9	3,3	5	83,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	12,1	32,4	2,0	5,2	0	0,0	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,5	40,9	1,4	6,6	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,3	44,2	0,5	7,1	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	44,7	0,1	7,2	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	55,3	100,0	8,9	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 08							
<i>Chronic Instability</i>	0,5	0,5	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	21,8	22,2	3,5	3,6	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	16,4	38,6	2,6	6,2	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,8	50,4	1,9	8,1	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,3	54,7	0,7	8,8	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	55,3	0,1	8,9	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	44,7	100,0	7,2	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 09							
<i>Chronic Instability</i>	6,0	6,0	1,0	1,0	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	30,8	36,7	5,0	5,9	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,0	49,8	2,1	8,0	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,9	58,7	1,4	9,5	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	2,9	61,6	0,5	9,9	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,3	61,9	0,1	10,0	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	38,1	100,0	6,1	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 10							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	3,2	3,2	0,5	0,5	2	33,3	33,3
log Q/T < -3,1	20,0	23,2	3,2	3,7	3	50,0	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	12,1	35,2	1,9	5,7	0	0,0	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,5	43,7	1,4	7,1	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,3	47,0	0,5	7,6	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	47,5	0,1	7,7	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	52,5	100,0	8,5	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 11							
<i>Chronic Instability</i>	0,4	0,4	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	12,1	12,5	2,0	2,0	3	50,0	50,0
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,2	25,7	2,1	4,1	2	33,3	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	9,9	35,6	1,6	5,7	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,0	39,6	0,7	6,4	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	40,3	0,1	6,5	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	59,7	100,0	9,6	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 12							
<i>Chronic Instability</i>	0,4	0,4	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	17,0	17,4	2,7	2,8	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	15,3	32,7	2,5	5,3	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,0	43,7	1,8	7,0	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,3	48,0	0,7	7,7	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,7	48,6	0,1	7,8	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	51,4	100,0	8,3	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 13							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	2,9	2,9	0,5	0,5	2	33,3	33,3
log Q/T < -3,1	19,1	22,0	3,1	3,6	3	50,0	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	12,1	34,1	1,9	5,5	0	0,0	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,4	42,5	1,4	6,9	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,2	45,7	0,5	7,4	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	46,2	0,1	7,5	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	53,8	100,0	8,7	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 14							
<i>Chronic Instability</i>	0,6	0,6	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	22,9	23,5	3,7	3,8	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	16,4	39,8	2,6	6,4	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,7	51,6	1,9	8,3	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,2	55,7	0,7	9,0	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	56,3	0,1	9,1	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	43,7	100,0	7,1	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 15							
<i>Chronic Instability</i>	0,5	0,5	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	18,2	18,6	2,9	3,0	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	15,4	34,0	2,5	5,5	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,0	44,9	1,8	7,3	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,2	49,2	0,7	7,9	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,7	49,8	0,1	8,0	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	50,2	100,0	8,1	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 16							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	6,3	6,3	1,0	1,0	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	31,2	37,5	5,0	6,0	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,0	50,4	2,1	8,1	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,9	59,3	1,4	9,6	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	2,8	62,1	0,5	10,0	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,3	62,5	0,1	10,1	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	37,6	100,0	6,1	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 17							
<i>Chronic Instability</i>	3,7	3,7	0,6	0,6	2	33,3	33,3
log Q/T < -3,1	20,7	24,4	3,3	3,9	3	50,0	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	12,0	36,4	1,9	5,9	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,5	44,8	1,4	7,2	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,2	48,0	0,5	7,7	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	48,5	0,1	7,8	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	51,5	100,0	8,3	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 18							
<i>Chronic Instability</i>	0,5	0,5	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	13,3	13,8	2,2	2,2	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,4	27,2	2,2	4,4	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	9,9	37,1	1,6	6,0	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,0	41,1	0,6	6,6	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,7	41,7	0,1	6,7	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	58,3	100,0	9,4	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 19							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	3,5	3,5	0,6	0,6	2	33,3	33,3
log Q/T < -3,1	20,1	23,6	3,2	3,8	3	50,0	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,8	35,4	1,9	5,7	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,4	43,8	1,4	7,1	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,2	47,0	0,5	7,6	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	47,4	0,1	7,7	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	52,6	100,0	8,5	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 20							
<i>Chronic Instability</i>	0,7	0,7	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	23,9	24,5	3,9	4,0	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	16,3	40,8	2,6	6,6	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,7	52,5	1,9	8,5	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,1	56,6	0,7	9,1	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	57,1	0,1	9,2	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	42,9	100,0	6,9	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 21							
<i>Chronic Instability</i>	6,5	6,5	1,1	1,1	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	31,5	38,0	5,1	6,1	3	50,0	100,0
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,0	51,0	2,1	8,2	0	0,0	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,9	59,8	1,4	9,7	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	2,8	62,6	0,5	10,1	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,3	62,9	0,0	10,1	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	37,1	100,0	6,0	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 22							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	4,0	4,0	0,7	0,7	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	21,4	25,4	3,4	4,1	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,9	37,3	1,9	6,0	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,5	45,8	1,4	7,4	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,1	48,9	0,5	7,9	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	49,3	0,1	8,0	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	50,7	100,0	8,2	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 23							
<i>Chronic Instability</i>	0,6	0,6	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	14,4	15,0	2,3	2,4	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,5	28,5	2,2	4,6	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	9,8	38,3	1,6	6,2	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,9	42,2	0,6	6,8	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	42,9	0,1	6,9	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	57,1	100,0	9,2	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 24							
<i>Chronic Instability</i>	0,6	0,6	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	19,2	19,7	3,1	3,2	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	15,2	35,0	2,5	5,6	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,0	45,9	1,8	7,4	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,2	50,1	0,7	8,1	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,7	50,7	0,1	8,2	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	49,3	100,0	8,0	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 25							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	4,0	4,0	0,6	0,6	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	20,9	24,8	3,4	4,0	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,7	36,5	1,9	5,9	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,3	44,8	1,3	7,2	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,1	48,0	0,5	7,7	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	48,4	0,1	7,8	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	51,6	100,0	8,3	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 26							
<i>Chronic Instability</i>	0,8	0,8	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	24,7	25,5	4,0	4,1	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	16,2	41,7	2,6	6,7	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,6	53,3	1,9	8,6	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,1	57,3	0,7	9,2	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	57,8	0,1	9,3	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	42,2	100,0	6,8	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 27							
<i>Chronic Instability</i>	6,8	6,8	1,1	1,1	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	31,7	38,5	5,1	6,2	3	50,0	100,0
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,0	51,5	2,1	8,3	0	0,0	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,8	60,3	1,4	9,7	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	2,8	63,0	0,4	10,2	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,3	63,3	0,0	10,2	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	36,7	100,0	5,9	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 28							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	4,4	4,4	0,7	0,7	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	22,0	26,3	3,5	4,2	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,9	38,2	1,9	6,2	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,4	46,6	1,4	7,5	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,0	49,7	0,5	8,0	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,4	50,1	0,1	8,1	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	49,9	100,0	8,0	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 29							
<i>Chronic Instability</i>	0,7	0,7	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	15,4	16,1	2,5	2,6	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,6	29,7	2,2	4,8	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	9,8	39,5	1,6	6,4	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,9	43,4	0,6	7,0	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	44,0	0,1	7,1	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	56,0	100,0	9,0	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 30							
<i>Chronic Instability</i>	0,7	0,7	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	19,9	20,6	3,2	3,3	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	15,3	35,8	2,5	5,8	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,0	46,8	1,8	7,6	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,1	50,9	0,7	8,2	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	51,5	0,1	8,3	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	48,5	100,0	7,8	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 31							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	4,4	4,4	0,7	0,7	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	21,5	25,9	3,5	4,2	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,7	37,6	1,9	6,1	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,3	45,9	1,3	7,4	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,0	48,9	0,5	7,9	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,4	49,4	0,1	8,0	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	50,7	100,0	8,2	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 32							
<i>Chronic Instability</i>	0,8	0,8	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	25,4	26,3	4,1	4,2	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	16,1	42,3	2,6	6,8	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,6	53,9	1,9	8,7	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,0	57,9	0,6	9,3	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	58,4	0,1	9,4	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	41,6	100,0	6,7	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 33							
<i>Chronic Instability</i>	7,0	7,0	1,1	1,1	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	31,9	38,9	5,1	6,3	3	50,0	100,0
-3,1 < log Q/T < -2,8	12,9	51,8	2,1	8,4	0	0,0	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,7	60,6	1,4	9,8	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	2,8	63,3	0,4	10,2	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,3	63,6	0,0	10,3	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	36,4	100,0	5,9	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 34							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	4,7	4,7	0,8	0,8	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	22,4	27,1	3,6	4,4	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,8	38,9	1,9	6,3	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,4	47,3	1,4	7,6	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,0	50,3	0,5	8,1	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,4	50,7	0,1	8,2	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	49,3	100,0	7,9	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 35							
<i>Chronic Instability</i>	0,8	0,8	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	16,2	17,1	2,6	2,7	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,7	30,7	2,2	5,0	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	9,7	40,4	1,6	6,5	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,9	44,3	0,6	7,2	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	44,9	0,1	7,2	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	55,1	100,0	8,9	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 36							
<i>Chronic Instability</i>	0,7	0,7	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	20,6	21,3	3,3	3,4	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	15,3	36,6	2,5	5,9	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,0	47,6	1,8	7,7	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,0	51,6	0,7	8,3	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	52,2	0,1	8,4	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	47,8	100,0	7,7	16,1	0	0,0	100,0

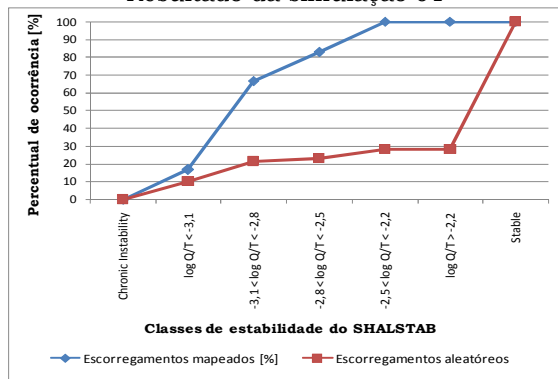
Resultado da simulação 37							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	4,8	4,8	0,8	0,8	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	22,1	26,9	3,6	4,3	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,7	38,5	1,9	6,2	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,3	46,8	1,3	7,6	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,0	49,8	0,5	8,0	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,4	50,2	0,1	8,1	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	49,8	100,0	8,0	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 38							
<i>Chronic Instability</i>	0,9	0,9	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	26,0	26,9	4,2	4,3	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	16,0	43,0	2,6	6,9	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,6	54,5	1,9	8,8	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,9	58,4	0,6	9,4	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	58,9	0,1	9,5	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	41,1	100,0	6,6	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 39							
<i>Chronic Instability</i>	7,2	7,2	1,2	1,2	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	32,1	39,3	5,2	6,3	3	50,0	100,0
-3,1 < log Q/T < -2,8	12,9	52,2	2,1	8,4	0	0,0	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,7	60,9	1,4	9,8	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	2,7	63,6	0,4	10,3	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,3	63,9	0,0	10,3	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	36,1	100,0	5,8	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 40							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	5,0	5,0	0,8	0,8	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	22,7	27,7	3,7	4,5	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,8	39,5	1,9	6,4	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,4	47,9	1,4	7,7	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,0	50,9	0,5	8,2	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,4	51,3	0,1	8,3	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	48,7	100,0	7,9	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 41							
<i>Chronic Instability</i>	0,9	0,9	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	17,0	17,9	2,7	2,9	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,7	31,6	2,2	5,1	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	9,7	41,2	1,6	6,6	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,8	45,0	0,6	7,3	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	45,6	0,1	7,4	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	54,4	100,0	8,8	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 42							
<i>Chronic Instability</i>	0,8	0,8	0,1	0,1	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	21,2	22,0	3,4	3,5	4	66,7	66,7
-3,1 < log Q/T < -2,8	15,3	37,2	2,5	6,0	1	16,7	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,0	48,2	1,8	7,8	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	4,0	52,2	0,6	8,4	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	52,8	0,1	8,5	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	47,2	100,0	7,6	16,1	0	0,0	100,0

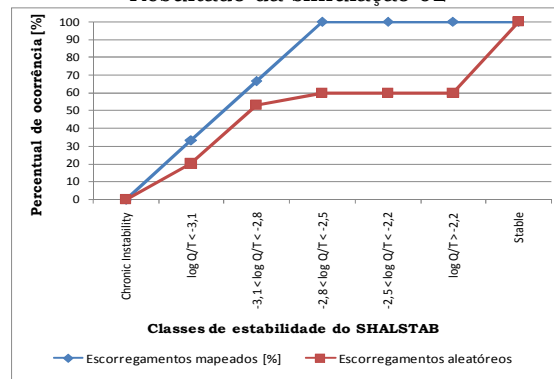
Resultado da simulação 43							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	6,4	6,4	1,0	1,0	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	23,8	30,2	3,8	4,9	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,5	41,8	1,9	6,7	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,1	49,8	1,3	8,0	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	2,8	52,6	0,4	8,5	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,4	53,0	0,1	8,5	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	47,1	100,0	7,6	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 44							
<i>Chronic Instability</i>	1,3	1,3	0,2	0,2	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	28,0	29,3	4,5	4,7	5	83,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	15,9	45,2	2,6	7,3	0	0,0	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	11,4	56,6	1,8	9,1	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,8	60,3	0,6	9,7	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	60,8	0,1	9,8	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	39,2	100,0	6,3	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 45							
<i>Chronic Instability</i>	7,8	7,8	1,3	1,3	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	32,8	40,6	5,3	6,6	3	50,0	100,0
-3,1 < log Q/T < -2,8	12,8	53,4	2,1	8,6	0	0,0	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,6	62,0	1,4	10,0	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	2,7	64,6	0,4	10,4	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,3	64,9	0,0	10,5	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	35,1	100,0	5,7	16,1	0	0,0	100,0

Resultado da simulação 46							
Classe de estabilidade	[%]	[%] Acumulado	Área [km ²]	Área acumulada da bacia [km ²]	Número de escorregamentos	[%]	[%] Acumulado
<i>Chronic Instability</i>	6,1	6,1	1,0	1,0	3	50,0	50,0
log Q/T < -3,1	24,0	30,1	3,9	4,9	2	33,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	11,7	41,8	1,9	6,7	1	16,7	100,0
-2,8 < log Q/T < -2,5	8,2	50,0	1,3	8,1	0	0,0	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	2,8	52,8	0,5	8,5	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,4	53,2	0,1	8,6	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	46,8	100,0	7,6	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 47							
<i>Chronic Instability</i>	1,4	1,4	0,2	0,2	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	19,2	20,7	3,1	3,3	5	83,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	13,6	34,3	2,2	5,5	0	0,0	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	9,6	43,9	1,6	7,1	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,6	47,5	0,6	7,7	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,6	48,1	0,1	7,8	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	51,9	100,0	8,4	16,1	0	0,0	100,0
Resultado da simulação 48							
<i>Chronic Instability</i>	1,1	1,1	0,2	0,2	0	0,0	0,0
log Q/T < -3,1	23,3	24,5	3,8	3,9	5	83,3	83,3
-3,1 < log Q/T < -2,8	15,2	39,6	2,4	6,4	0	0,0	83,3
-2,8 < log Q/T < -2,5	10,8	50,4	1,7	8,1	1	16,7	100,0
-2,5 < log Q/T < -2,2	3,9	54,3	0,6	8,8	0	0,0	100,0
log Q/T > -2,2	0,5	54,8	0,1	8,8	0	0,0	100,0
<i>Stable</i>	45,2	100,0	7,3	16,1	0	0,0	100,0

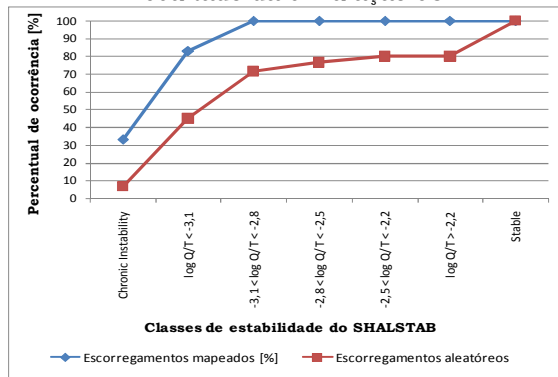
Resultado da simulação 01



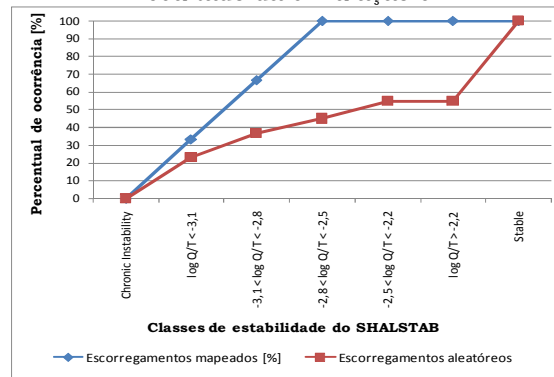
Resultado da simulação 02



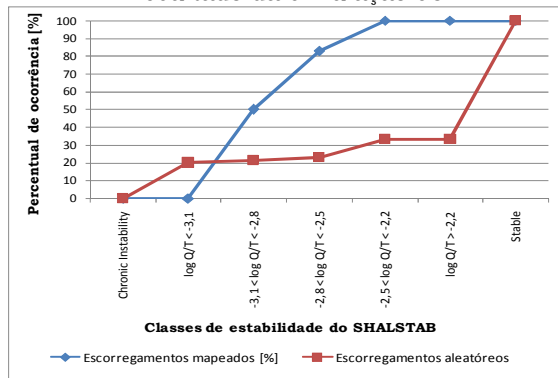
Resultado da simulação 03



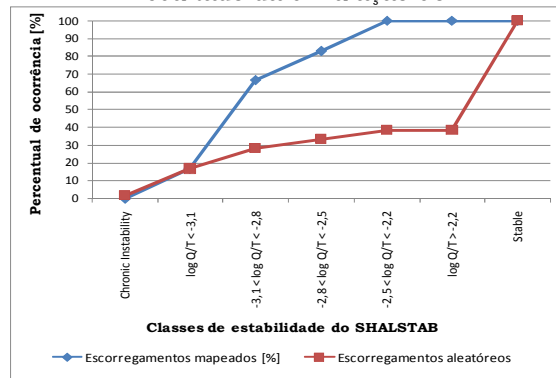
Resultado da simulação 04



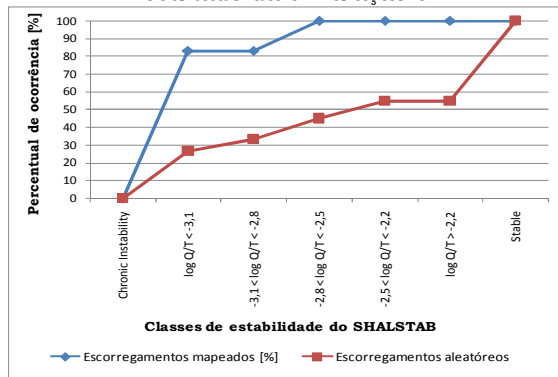
Resultado da simulação 05



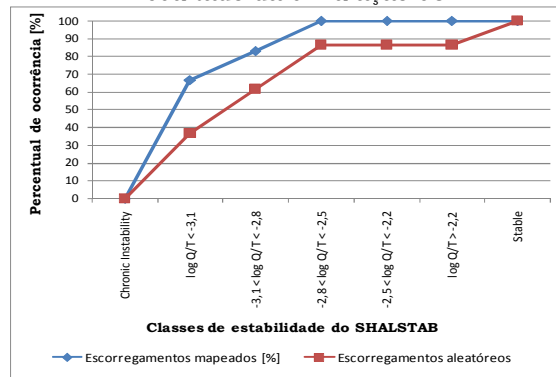
Resultado da simulação 06



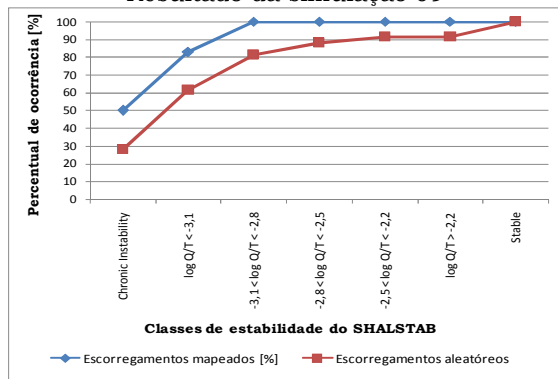
Resultado da simulação 07



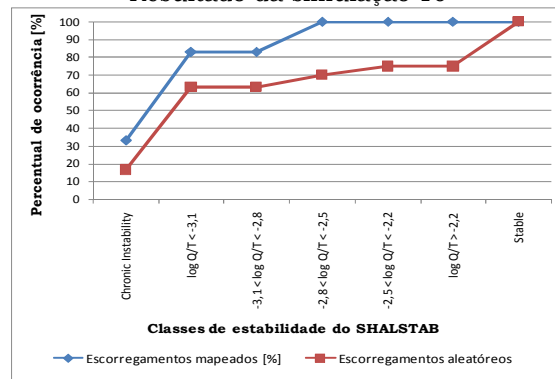
Resultado da simulação 08



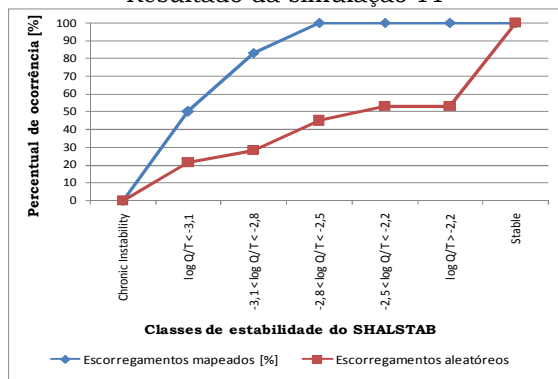
Resultado da simulação 09



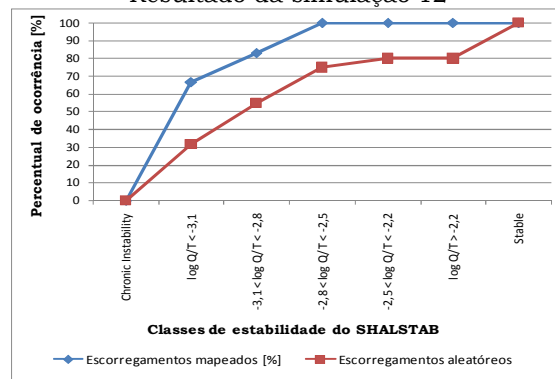
Resultado da simulação 10



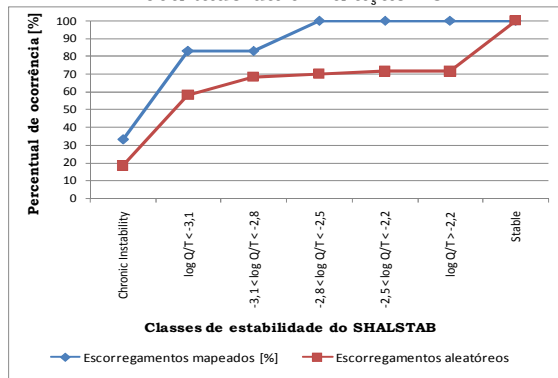
Resultado da simulação 11



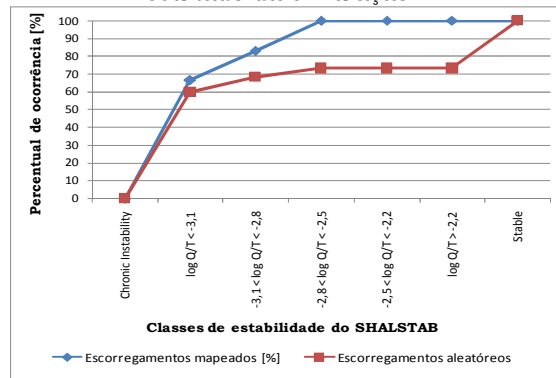
Resultado da simulação 12



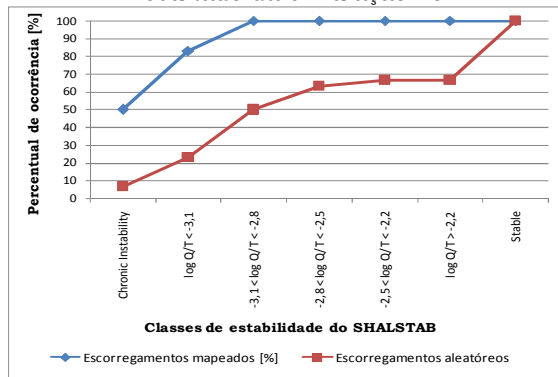
Resultado da simulação 13



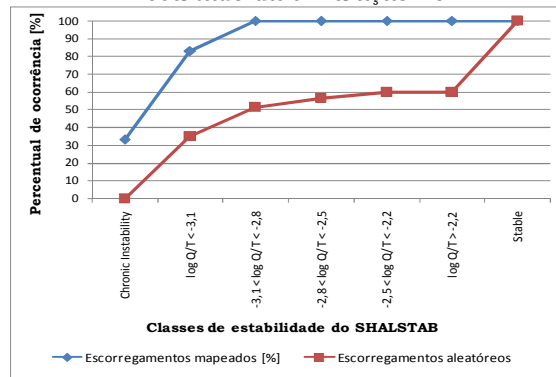
Resultado da simulação 14



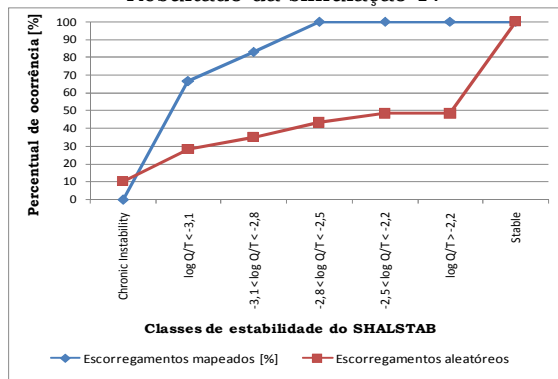
Resultado da simulação 15



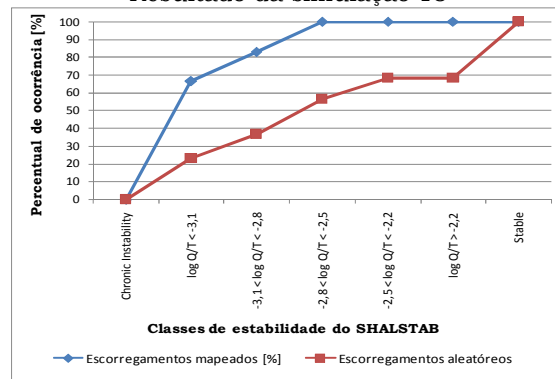
Resultado da simulação 16



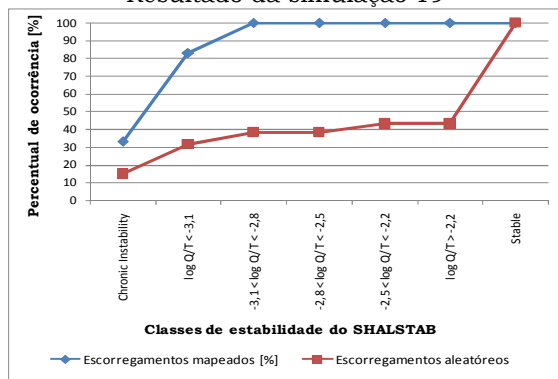
Resultado da simulação 17



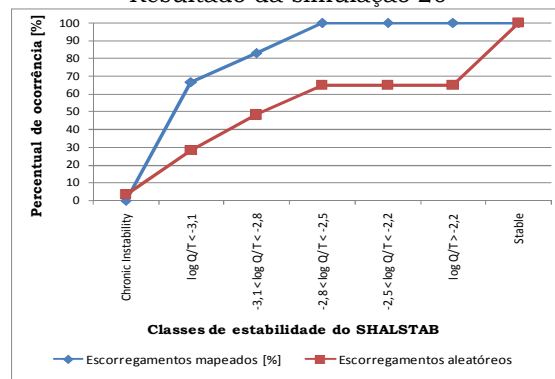
Resultado da simulação 18



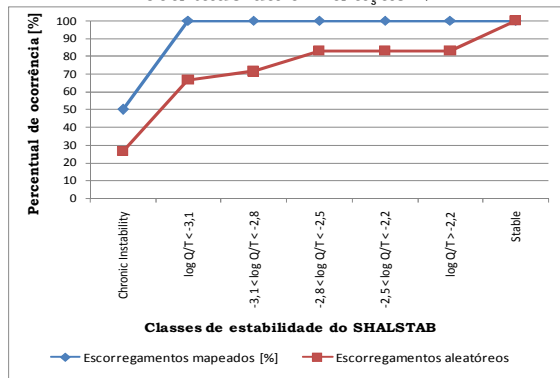
Resultado da simulação 19



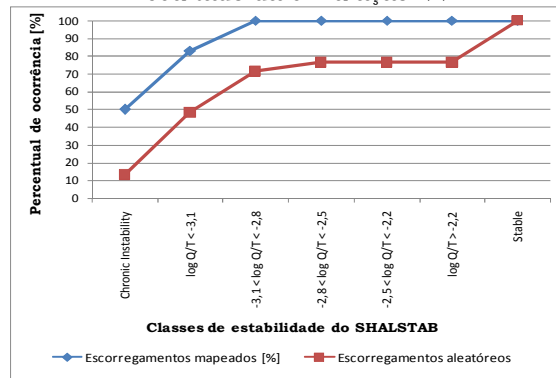
Resultado da simulação 20



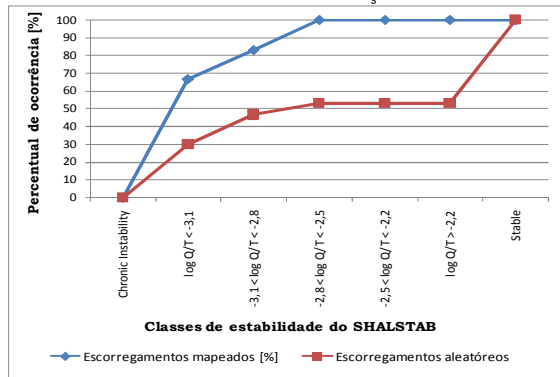
Resultado da simulação 21



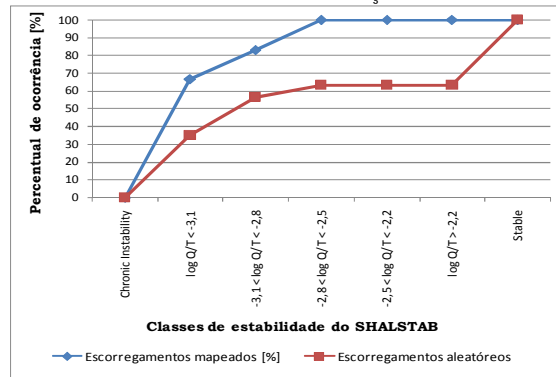
Resultado da simulação 22



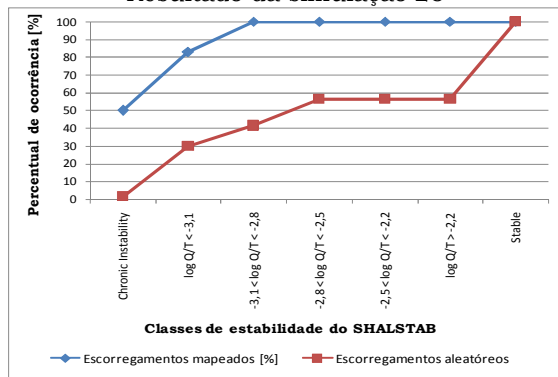
Resultado da simulação 23



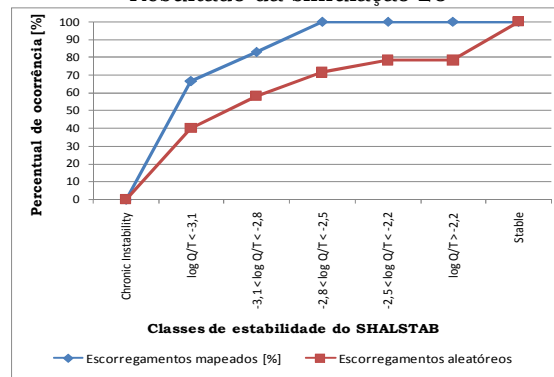
Resultado da simulação 24



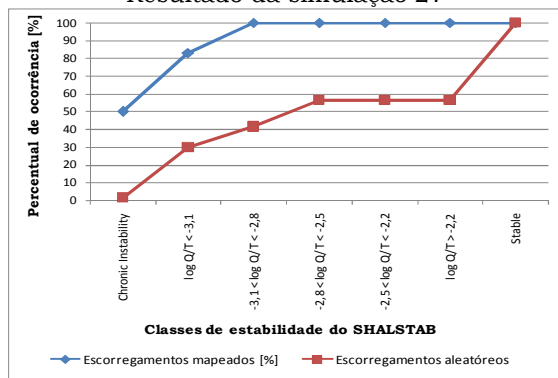
Resultado da simulação 25



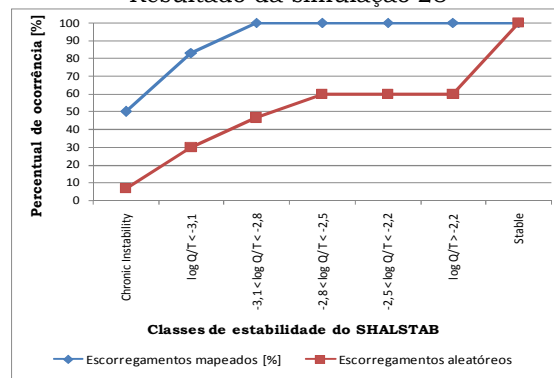
Resultado da simulação 26



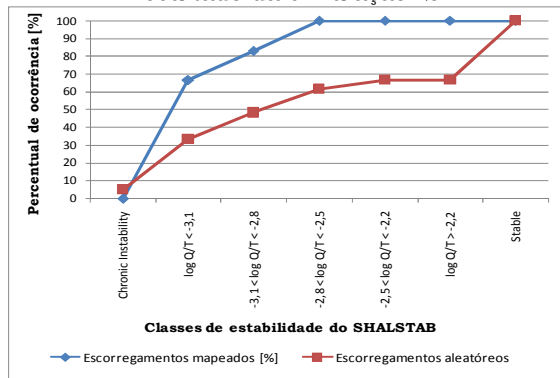
Resultado da simulação 27



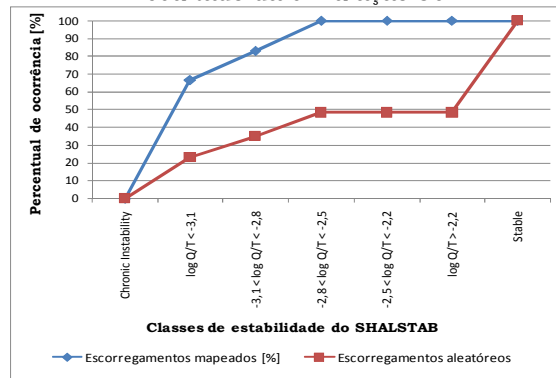
Resultado da simulação 28



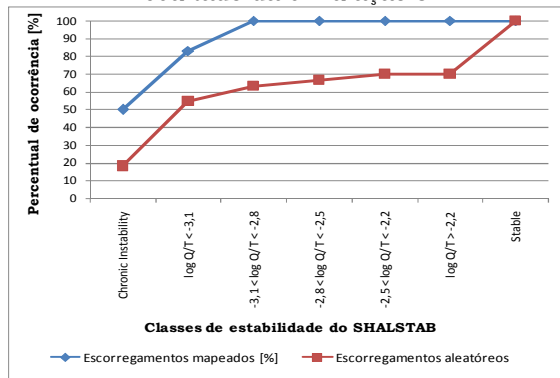
Resultado da simulação 29



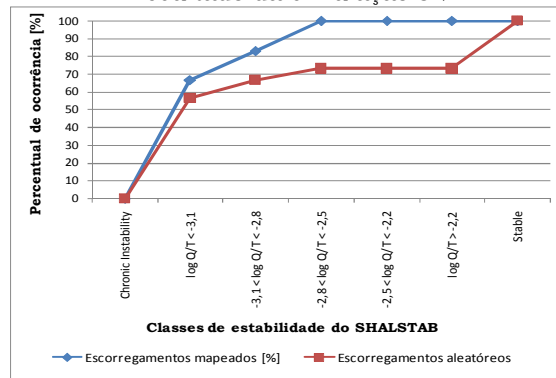
Resultado da simulação 30



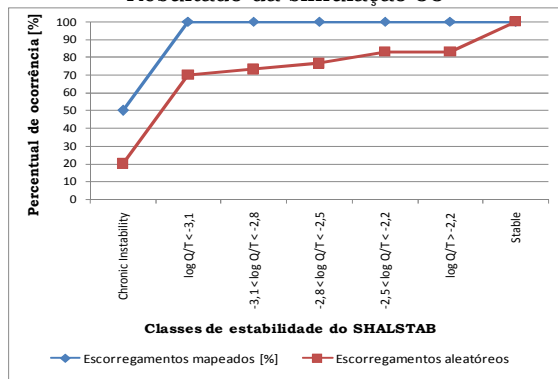
Resultado da simulação 31



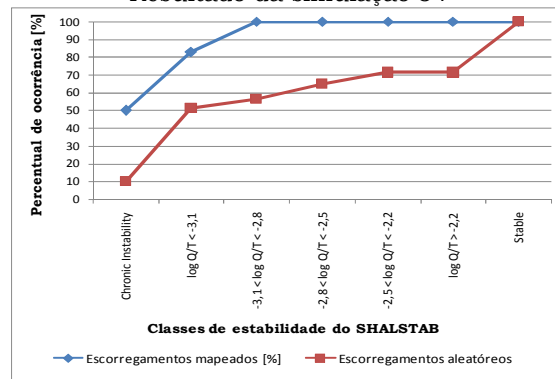
Resultado da simulação 32



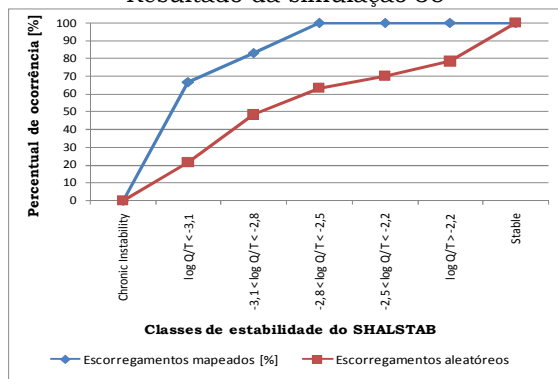
Resultado da simulação 33



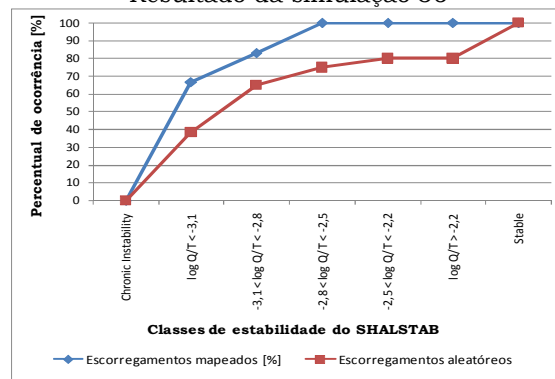
Resultado da simulação 34



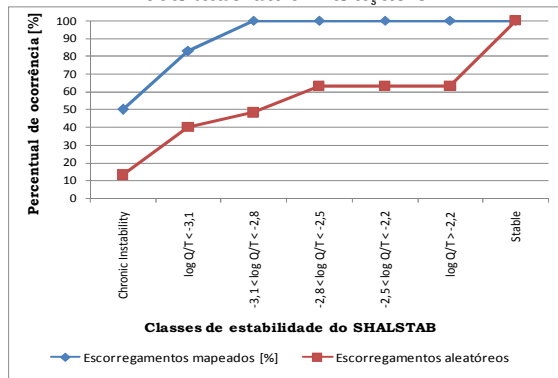
Resultado da simulação 35



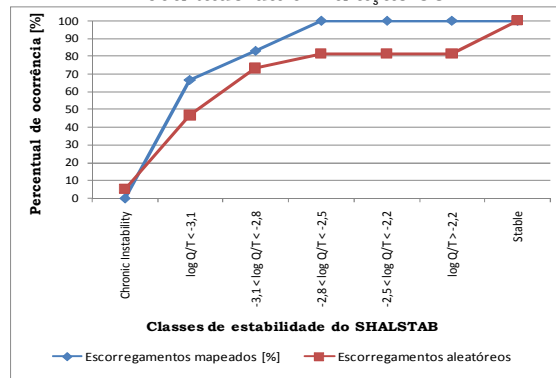
Resultado da simulação 36



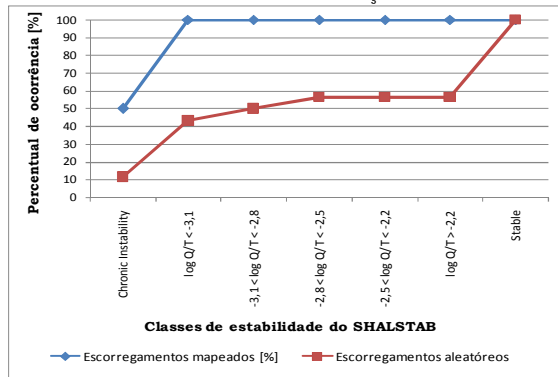
Resultado da simulação 37



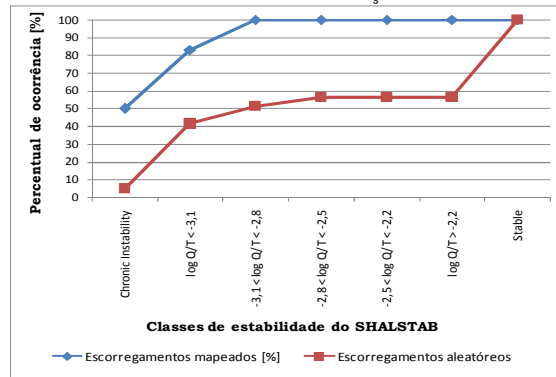
Resultado da simulação 38



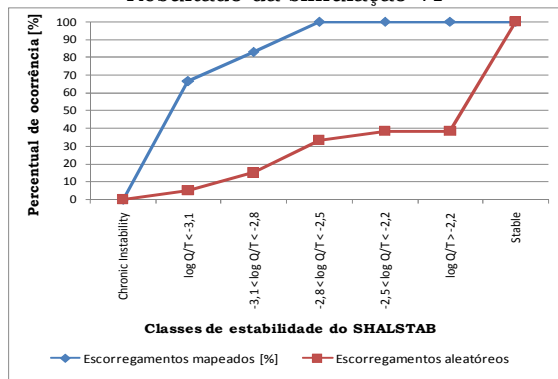
Resultado da simulação 39



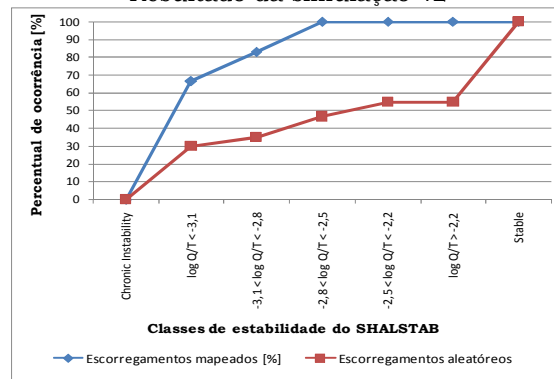
Resultado da simulação 40



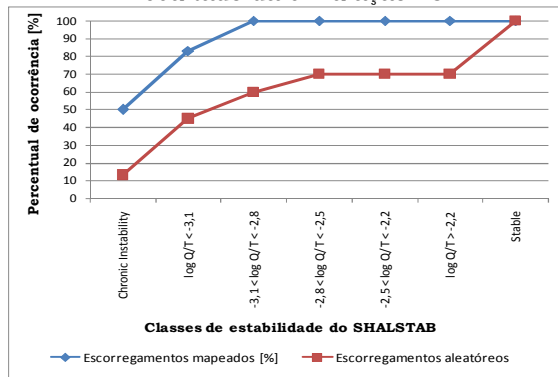
Resultado da simulação 41



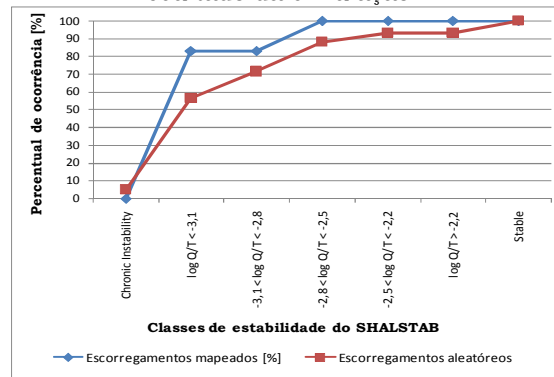
Resultado da simulação 42



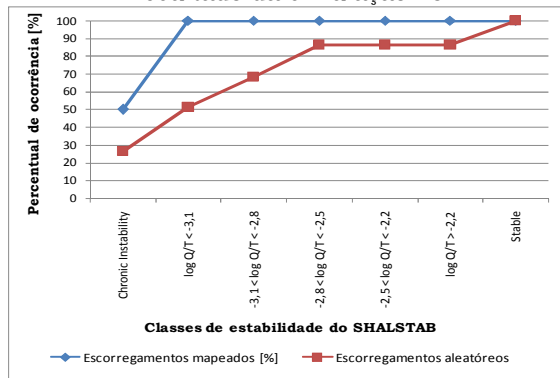
Resultado da simulação 43



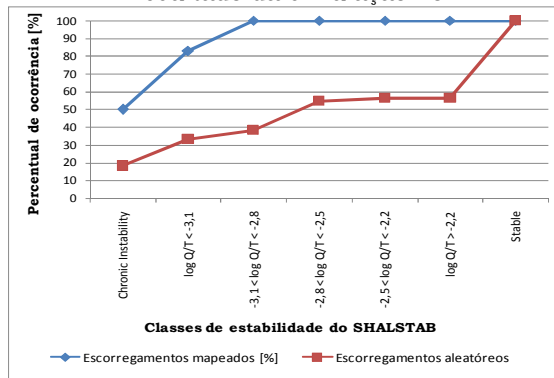
Resultado da simulação 44



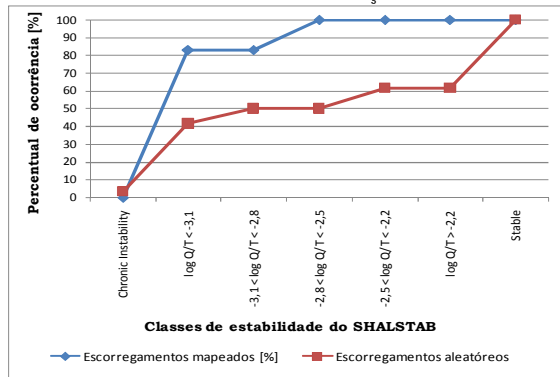
Resultado da simulação 45



Resultado da simulação 46



Resultado da simulação 47



Resultado da simulação 48

